



Estudio del comportamiento
estructural de un elemento de
generación piezoeléctrico tipo Bridge
para ser implementado en carretera.
Simulaciones numéricas

MEMORIA

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

Autora: Laura González Estévez

Director: Ernest Bernat Masó

Convocatoria: junio 2020



RESUMEN

Actualmente nos encontramos en una época en que la sensibilización y la conciencia de la ciudadanía por el cambio climático y el calentamiento global ha aumentado considerablemente. Consecuentemente, también han aumentado los estudios e investigaciones relacionados con las energías renovables, ya que, actualmente, se realiza un consumo masivo de combustibles fósiles, que además son finitos.

Los sistemas *energy harvesting*, se utilizan para aprovechar energía residual proveniente de fuentes externas para producir energía eléctrica a menor escala. En este trabajo, se propone generar energía eléctrica a través del efecto piezoeléctrico, mediante el aprovechamiento de esfuerzos mecánicos producidos por vehículos.

Este proyecto estudia la implantación de un transductor piezoeléctrico en carretera que sea capaz de generar energía eléctrica gracias a los esfuerzos que generan los coches que circulan sobre ella.

El objetivo principal es estudiar y optimizar el diseño de una estructura que permita generar la máxima energía posible y que a su vez no se rompa con el paso de los vehículos.

El estudio se lleva a cabo mediante la realización de simulaciones numéricas a partir de las que se determina la geometría óptima del transductor piezoeléctrico, la posición del transductor en el pavimento, la posición óptima de aplicación de las cargas y finalmente, la salida eléctrica que proporciona el conjunto.

Palabras claves: *energy harvesting*, piezoelectricidad, transductor piezoeléctrico, optimización mecánica, modelo de elementos finitos, simulaciones numéricas.



ABSTRACT

Nowadays, the society is experimenting a growth of the sensitization and awareness of climate change and global warming. In consequence, studies and research related to renewable energies have also increased, since there is a current massive consumption of fossil fuels, which are considered finite resources.

The energy harvesting systems are used to reuse residual energy from external sources to produce electrical energy in small quantities. In this project, the purpose is to study the generation of electrical energy through the piezoelectric effect, by taking advantage of the mechanical stresses produced by vehicles.

Therefore, this project studies the implementation of a piezoelectric transducer under the road that is capable to generate electrical energy thanks to the efforts produced by the circulation of cars on the road.

The main objective is to study and optimize the design of a structure that allows generating the maximum possible energy and it doesn't break when the pass of the vehicles.

The study is carried out by implementing different numerical simulations from which it's determined the optimal geometry of the piezoelectric transducer, the position of the transducer on the asphalt, the optimal position of loads application and finally, the electrical output generated by the assembly.

Key words: energy harvesting, piezoelectricity, piezoelectric transducer, mechanical optimization, finite element method, numerical simulation.



AGRACEDIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Ernest, por haber tutorizado y enfocado este trabajo como es debido. Agradezco la ayuda y disponibilidad que ha mostrado durante todo el proyecto, así como en otros momentos del grado en los que hemos coincidido.

En segundo lugar, gracias a mi familia y amigos, que han sido un gran apoyo a lo largo de mi etapa estudiantil, han tenido mucha paciencia y me han ayudado en todo momento, especialmente estos últimos años. Sé que lidiar con el estrés y perfeccionismo de alguien que estudia ingeniería y estudios musicales de violín no es nada fácil, pero ellos lo han conseguido con creces.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Alcance	2
1.3	Requisitos	3
1.4	Justificación y utilidad	3
2.	ESTADO DEL ARTE	4
2.1	Historia de la piezoelectricidad	4
2.2	Aplicaciones cotidianas del efecto piezoeléctrico	5
2.3	Piezoelectricidad y <i>energy harvesting</i> en la actualidad	6
2.4	<i>Energy harvesting</i>	9
2.4.1	Clasificación de los sistemas <i>energy harvesting</i>	11
2.5	Piezoelectricidad	13
2.5.1	Sensores, actuadores y transductores	13
2.5.2	Efecto piezoeléctrico	14
2.5.3	Materiales piezoeléctricos	16
2.5.4	Fabricación y polarización de cerámicas piezoeléctricas	18
2.5.5	Constantes piezoeléctricas.....	21
2.5.6	Modos de operación piezoeléctricos	24
2.5.7	Ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad	28
2.5.8	Geometría de los transductores piezoeléctricos	29
3.	MODELIZACIÓN NUMÉRICA	32
3.1	Modelo para la optimización del bridge en 2D	33
3.1.1	Geometría/variables a optimizar	34
3.1.2	Condiciones de contorno, contactos y cargas.....	35
3.1.3	Mallado.....	37
3.1.4	Resultados	38
3.2	Modelo para la optimización de la posición del bridge en 2D	51
3.2.1	Geometría/variables a optimizar	51
3.2.2	Condiciones de contorno, contactos y cargas.....	56



3.2.3	Mallado.....	57
3.2.4	Resultados	58
3.3	Modelo para la modelización de la salida eléctrica (3D)	60
3.3.1	Geometría/variables a optimizar	60
3.3.2	Condiciones de contorno, contactos y cargas.....	63
3.3.3	Mallado.....	64
3.3.4	Resultados	65
4.	RESUMEN ECONÓMICO	67
5.	PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN	68
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Imagen de los hermanos Curie. Jacques Curie (Izqda.) y Pierre Curie (Dcha.). Obtenido de [13] ...</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2. Imagen de Gabriel Lippmann. Obtenido de [14]</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Funcionamiento del efecto piezoeléctrico en un encendedor. Obtenido de [15].....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 4. Funcionamiento del efecto piezoeléctrico en un inyector de combustible. Obtenido de [16]</i>	<i>6</i>
<i>Figura 5. Suelo con baldosas piezoeléctricas en el Club Watt (Rotterdam) Obtenido de [17].....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 6. Instalación de baldosas piezoeléctricas en la estación de Tokio. Obtenido de [21]</i>	<i>7</i>
<i>Figura 7. Instalación de baldosas Pavegen en Oxford Street. Obtenido de [47]</i>	<i>8</i>
<i>Figura 8. Resultado de las baldosas Pavegen en Oxford Street. Obtenido de [47].....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 9. Fuentes de energía residual. Obtenido de [3].....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 10. Porcentaje por tipos de energía del año 1990 al 2035. Obtenido de [4]</i>	<i>10</i>
<i>Figura 11. Fuentes de energía aprovechada por el "energy harvesting" y sus respectivos transductores para convertirla en energía eléctrica. Obtenida de [6]</i>	<i>11</i>
<i>Figura 12. Diagrama de bloques del funcionamiento de un sensor autónomo gracias al energy harvesting. Obtenido de [7].....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 13. Predicción del mercado global de las energy harvesting en miles de \$. Desde el año 2014 al 2024. Obtenido de [8].....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 14. Principios de conversión bidireccional más comunes y diversos tipos de energías de entrada y salida. Obtenido de [12]</i>	<i>13</i>
<i>Figura 15. Efecto piezoeléctrico directo (Izqda.) y efecto piezoeléctrico inverso (Dcha.). Obtenido de [23]</i>	<i>14</i>
<i>Figura 16. Estructura interna de un cristal de Cuarzo. a) Estado original, sin aplicación de tensión.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 17. Estructura de un material monocristalino. Obtenido de [24].....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 18. Estructura de un material policristalino. Obtenido de [24]</i>	<i>17</i>
<i>Figura 19. Estructura perovskita de una cerámica piezoeléctrica. a) En estado neutro, b) Después de ser polarizada. Obtenido de [28].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 20. Proceso de polarización de una cerámica piezoeléctrica. a) Los dominios están desordenados y la polarización global es nula. b) Se aplica un campo eléctrico que alinea los dominios. c) Se quita el campo eléctrico alineado y los dominios permanecen alineados (polarización remanente). Obtenido de [6]</i>	<i>19</i>
<i>Figura 21. Ciclo de histéresis ferroeléctrica. Obtenido de [29]</i>	<i>20</i>
<i>Figura 22. Dirección de fuerzas aplicadas/producidas en una cerámica piezoeléctrica. Obtenido de [31]</i>	<i>21</i>
<i>Figura 23. Modo de operación d33. Obtenido de [28].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 24. Modo de operación d31. Obtenido de [28].....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 25. . Estructura de viga en voladizo (El dispositivo trabaja con el modo d31). Obtenido de [24] ...</i>	<i>26</i>
<i>Figura 26. a) Configuración bimorfa conectada en serie. b) Configuración bimorfa conectada en paralelo. c) Configuración unimorfa. Obtenido de [33].....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 27. Modo de operación d15. Obtenido de [28].....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 28. Transductor piezoeléctrico tipo Moonie. Obtenido de [40]</i>	<i>30</i>
<i>Figura 29. Transductor piezoeléctrico tipo Cymbal. Obtenido de [38][39].....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 30. Transductor piezoeléctrico tipo Bridge. Obtenido de [39].....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 31. Relación de tensión mecánica y densidad de energía eléctrica almacenada en los transductores tipo Moonie, Cymbal y Bridge. Obtenido de [37]</i>	<i>31</i>

Figura 32. Medidas en mm del piezoeléctrico P876 A12. Obtenido de [41]	32
Figura 33. Geometría del transductor tipo Bridge estudiado. Fuente propia.....	34
Figura 34. Croquis en que se indican las variables definidas para realizar el estudio por simetría. Fuente propia.	34
Figura 35. Simulación de un contacto bonded en SolidWorks. Obtenido de [42].....	36
Figura 36. Contactos y cargas aplicadas en el modelo para la optimización del Bridge en 2D para vehículos pesados. Fuente propia	36
Figura 37. Materiales utilizados en cada pieza del transductor. Fuente propia.....	39
Figura 38. Simulación de la tensión equivalente en la estructura final para vehículos pesados. Fuente propia.	39
Figura 39. Croquis parámetro C'. Fuente propia.	40
Figura 40. Diagrama cortante y diagrama de momentos de una viga biapoyada con dos fuerzas aplicadas. Obtenido de [44].....	41
Figura 41. Croquis parámetro D. Fuente propia.	41
Figura 42. Croquis parámetro B'. Fuente propia.	42
Figura 43. Croquis parámetro E. Fuente propia.	43
Figura 44. Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos para vehículos pesados. Fuente propia	44
Figura 45. Factor de seguridad de la estructura para vehículos pesados. Fuente propia.	45
Figura 46. Croquis parámetro G. Fuente propia	45
Figura 47. Croquis del parámetro H. Fuente propia.	46
Figura 48. Croquis de los parámetros E, F y G. Fuente propia.	49
Figura 49. Croquis en que se indican los parámetros dimensionales de la geometría final. Fuente propia.	51
Figura 50. Leyenda para interpretar los materiales utilizados en la sección de firme 4211 y 0032. Obtenido de [45]	52
Figura 51. Configuración básica de la sección de firme 4211. Obtenido de [45].....	52
Figura 52. Configuración de la sección 4211 utilizada. Se indican las medidas de cada capa en cm y sus respectivos módulos de Young. Fuente propia.	52
Figura 53. Configuración básica de la sección de firme 0032. Obtenido de [45].....	53
Figura 54. Configuración de la sección 0032 utilizada. Se indican las medidas de cada capa en cm y sus respectivos módulos de Young. Fuente propia	53
Figura 55. Colocación del transductor piezoeléctrico en el pavimento. Medidas en milímetros. Fuente propia.	54
Figura 56. Neumático pasando por encima del transductor (Carga centrada). Fuente propia.....	55
Figura 57. Neumático pasando a 75 cm del transductor (Carga descentrada). Fuente propia.....	55
Figura 58. Condiciones de contorno de una simulación de pavimento ligero y carga centrada para vehículos pesados. Fuente propia.	56
Figura 59. Condiciones de contorno de una simulación de pavimento ligero y carga descentrada para vehículos pesados. Fuente propia.....	57
Figura 60. Mallado realizado en la implantación del transductor piezoeléctrico en el pavimento. Fuente propia.	57
Figura 61. Partes de una cerámica piezoeléctrica. Obtenido de [41]	60



Figura 62. Superficie de contacto de un neumático en función de la presión que contiene. Obtenido de [46]
..... 61

Figura 63. Superficie cuadrada de costados de 20 cm que representa la huella del neumático en 3D. Fuente propia. 61

Figura 64. Eje de polarización de las cerámicas piezoeléctricas. Fuente propia. 62

Figura 65. Superficies de las cerámicas piezoeléctricas en las que se aplica un voltaje 0. Fuente propia... 62

Figura 66. Superficies de las cerámicas piezoeléctricas en las que se realiza la acción de voltaje acoplado. Fuente propia. 63

Figura 67. Condiciones de contorno en el modelo en 3D para modelizar la salida eléctrica de la aplicación de la carga centrada. Pavimento de tráfico ligero y valor de la carga para vehículos pesados. Fuente propia.
..... 63

Figura 68. Mallado realizado en el modelo en 3D. Fuente propia...... 64

Figura 69. Planificación inicial del proyecto. Fuente propia...... 68

Figura 70. Planificación final del proyecto. Fuente propia. 68

Figura 71. Croquis de la geometría final. Fuente propia. 69



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Valores estudiados por cada uno de los parámetros independientes</i>	35
<i>Tabla 2. Resultados obtenidos según la variación de nodos de la malla para vehículos pesados. Fuente propia.</i>	37
<i>Tabla 3. Propiedades principales de los materiales del transductor. Fuente propia.</i>	38
<i>Tabla 4. Resultados obtenidos de la variación del parámetro C' y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	40
<i>Tabla 5. Resultados obtenidos de la variación del parámetro D y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	42
<i>Tabla 6. Resultados obtenidos de la variación del parámetro B' y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	43
<i>Tabla 7. Resultados obtenidos de la variación del parámetro E y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	44
<i>Tabla 8. Resultados obtenidos de la variación del parámetro G y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	46
<i>Tabla 9. Resultados obtenidos de la variación del parámetro H y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	47
<i>Tabla 10. Resultados obtenidos de la variación del parámetro F y valor seleccionado. Fuente propia.</i>	48
<i>Tabla 11. Dimensiones previas al reajuste de los parámetros E, F y G. Fuente propia.</i>	48
<i>Tabla 12. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro G. Fuente propia.</i>	49
<i>Tabla 13. Resultados obtenidos al reajustar el parámetro G. Fuente propia.</i>	49
<i>Tabla 14. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro E. Fuente propia.</i>	50
<i>Tabla 15. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro F. Fuente propia.</i>	50
<i>Tabla 16. Resultados obtenidos con la geometría final para vehículos ligeros y pesados. Fuente propia.</i>	50
<i>Tabla 17. Dimensiones de la geometría final. Fuente propia.</i>	51
<i>Tabla 18. Resultados obtenidos al estudiar la posición de aplicación de las cargas en pavimento para tráfico ligero. Fuente propia.</i>	58
<i>Tabla 19. Resultados obtenidos al estudiar la posición de aplicación de las cargas en pavimento para tráfico pesado. Fuente propia.</i>	58
<i>Tabla 20. Propiedades de la cerámica piezoeléctrica PIC255. Fuente propia.</i>	60
<i>Tabla 21. Coeficientes piezoeléctricos de la cerámica PIC255. Fuente propia.</i>	62
<i>Tabla 22. Modelización de la salida eléctrica para la aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico ligero. Fuente propia.</i>	65
<i>Tabla 23. Modelización de la salida eléctrica para la aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico pesado. Fuente propia.</i>	65
<i>Tabla 24. Tabla de costes. Fuente propia.</i>	67
<i>Tabla 25. Dimensiones finales. Fuente propia.</i>	69

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se basa en el estudio y optimización del diseño de un transductor piezoeléctrico tipo Bridge para ser implementado en carretera mediante la realización de diversas simulaciones numéricas.

En primer lugar, es necesario realizar una introducción a la piezoelectricidad y los sistemas *energy harvesting*. Por ello, se ha realizado un marco teórico que se encuentra redactado en el apartado "2. Estado del arte". A lo largo de este apartado, se expone brevemente la historia de la piezoelectricidad, distintas aplicaciones de materiales piezoeléctricos y el concepto de *energy harvesting*. Más adelante, se ha profundizado en temas como: el efecto piezoeléctrico, los materiales piezoeléctricos y su fabricación, las constantes, modos y ecuaciones piezoeléctricas y los distintos tipos de transductores piezoeléctricos.

Una vez se ha profundizado en la parte teórica del trabajo, se procede a realizar la parte experimental que se basa en la modelización numérica para optimizar un transductor piezoeléctrico tipo Bridge. En el apartado "3. Modelización numérica", se observan los tres grandes grupos de simulaciones en las que se ha dividido el estudio:

- **Modelo para la optimización del Bridge en 2D:** Se optimiza la geometría del transductor piezoeléctrico en 2D para encontrar el diseño que ofrece los mejores resultados.
- **Modelo para la optimización de la posición del Bridge en 2D:** Una vez obtenida la geometría óptima, se implementa en el pavimento para definir la profundidad a la que se debe colocar el transductor y se estudia la influencia de la posición de aplicación de las cargas en dos tipos de pavimentos distintos.
- **Modelo para la modelización de la salida eléctrica (3D):** Finalmente, se analiza la salida eléctrica que ofrece el sistema determinado anteriormente.

Al final del documento, se puede observar la realización de un pequeño estudio económico. Además, se puede observar la planificación planteada inicialmente y la planificación final una vez terminado el proyecto. Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas y los distintos tipos de recomendaciones o ideas para proyectos futuros.

1.1 Objectivos

El principal objetivo de este proyecto es estudiar y optimizar el diseño de la estructura de un transductor piezoeléctrico tipo Bridge para ser implementado en carretera. El estudio se realiza mediante la realización de diversas simulaciones numéricas realizadas con el programa ANSYS.

Se estudian los distintos parámetros dimensionales del transductor y se analizan los resultados para obtener el diseño más óptimo. Se considera estructura óptima aquella que transmite la máxima deformación posible a la cerámica piezoeléctrica pero que a su vez resiste los esfuerzos a los que está sometida, es decir, resiste el paso de los vehículos que circulan por la carretera, tanto si se trata de vehículos ligeros como pesados. La cerámica piezoeléctrica, estar sometida a las máximas deformaciones posibles, también generará la mayor cantidad de energía posible.

Una vez obtenido el diseño óptimo, se estudia el posicionamiento del transductor en la carretera, analizando la profundidad de posicionamiento y el posicionamiento de las cargas aplicadas en dos tipos distintos de pavimento, uno considerado para el tráfico ligero y otro para el tráfico pesado.

Finalmente, se escoge la situación que mayores deformaciones genera y se modeliza la salida eléctrica del dispositivo para ambos tipos de pavimento. De esta forma, se puede obtener la información de la máxima energía eléctrica que es capaz de generar el transductor piezoeléctrico en ambas situaciones.

1.2 Alcance

A lo largo del estudio se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Realizar diversas simulaciones numéricas estudiado como afecta los resultados la variación de distintos parámetros: mallado, dimensiones, cargas y soportes aplicados.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos para poder definir el diseño más óptimo.
- Simular la implementación del diseño definitivo en el pavimento y analizar los resultados.
- Simulación de la salida eléctrica generada por el mejor diseño más óptimo definido anteriormente.

Por otro lado, quedan excluidos del estudio los siguientes aspectos:

- El tratamiento/procesamiento de la señal eléctrica.
- El almacenamiento de la energía generada por el transductor piezoeléctrico.
- El diseño específico de las mezclas de aglomerado.
- No se incluyen otros diseños de transductores, como, por ejemplo, el tipo Cymbal o Moonie.

1.3 Requisitos

Los principales requisitos del proyecto son los siguientes:

- Realizar las simulaciones numéricas con el software ANSYS.
- Ajustar y adaptar las simulaciones a los procesos experimentales, en la medida de lo posible.
- Modelizar un transductor piezoeléctrico tipo bridge, hecho que implica limitaciones geométricas.
- Utilizar el piezoeléctrico P876 A12 de cerámica PIC255. Este punto implica limitaciones dimensionales a la hora de diseñar el transductor, ya que, será necesario cerciorarse de que tiene las medidas adecuadas para contener e incorporar el material piezoeléctrico.
- Realizar el estudio teniendo en cuenta una carga de 0,1MPa para vehículos ligeros y 1MPa para vehículos pesados. El transductor piezoeléctrico debe deformarse lo suficiente con el paso de los vehículos ligeros y no romperse con el paso de vehículos pesados.
- La estructura debe tener un FS=1,5 para facilitar la comparación de resultados con el TFG realizado paralelamente por otro alumno.

1.4 Justificación y utilidad

Al inicio del proyecto, se exponen los distintos sistemas *energy harvesting* que existen en la actualidad, además se indican los más eficientes y estudiados, y, por lo tanto, los que se espera que aportaran mayores cambios en el mundo de la recolección de energía.

Se profundiza concretamente, en la generación de energía a través de la implantación de materiales piezoeléctricos en el pavimento. De forma que se pueda recolectar la energía que desprenden los vehículos al pasar por la carretera. Esta idea resulta muy atractiva, ya que, implica que los propios ciudadanos puedan generar la propia energía que utilizaran posteriormente a través de realizar actividades cotidianas como conducir.

La principal utilidad de este proyecto, es estudiar el diseño que debe tener el transductor piezoeléctrico para generar la mayor cantidad de energía posible y, además, qué posición debe ocupar en el pavimento para optimizar todavía más su aplicación.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Historia de la piezoelectricidad

La palabra piezoelectricidad proviene del griego “piezein”, que significa apretar o comprimir.

1880: El efecto piezoeléctrico fue descubierto por los hermanos Curie (Jacques Curie y Pierre Curie). Los hermanos Curie demostraron que, al aplicar ciertas tensiones a materiales cristalinos, éstos generaban una carga eléctrica proporcional a la tensión aplicada (Efecto piezoeléctrico directo). Realizaron sus experimentos con materiales como el topacio, la turmalina, el cuarzo y la sal de Rochelle (Sal de Saginette). A raíz de sus experimentos llegaron a la conclusión de que el cuarzo y la sal de Rochelle eran los materiales que más piezoelectricidad presentaban, es decir, generaban mayor diferencia de potencial al ser sometidos a esfuerzos.

1881: El científico Gabriel Lippman demostró a partir de principios termodinámicos el efecto contrario, es decir, la posibilidad de que se produjesen deformaciones mecánicas en un material al aplicarle cargas eléctricas. Fue entonces, cuando los hermanos Curie confirmaron experimentalmente el efecto piezoeléctrico inverso.



Figura 1 Imagen de los hermanos Curie. Jacques Curie (Izqda.) y Pierre Curie (Dcha.). Obtenido de [13]

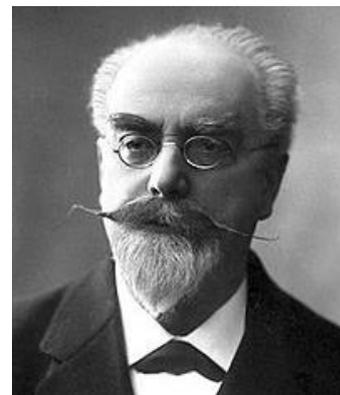


Figura 2. Imagen de Gabriel Lippmann. Obtenido de [14]

1910: Después de realizar diversos estudios, Woldemar Voigt publicó “Lehrbuch der Kristallphysik” (Física de cristales), dónde se explicaba el comportamiento de 20 tipos de materiales piezoeléctricos distintos.

1917: A finales de la Primera Guerra Mundial se realizó la primera aplicación práctica del efecto piezoeléctrico. Paul Langevin desarrolló el sonar, elemento que utilizaban en el ámbito militar y les facilitaba la detección de submarinos enemigos a partir de ondas sonoras. El componente principal del sonar era un cristal de cuarzo colocado entre dos placas de acero.

1920-1940: Después de muchos años de estudio, se inventaron los transductores ultrasónicos, que permitían la medición de viscosidad en fluidos y sólidos.

1940-1965: Durante la Segunda Guerra Mundial distintos grupos de investigación descubrieron nuevos materiales sintéticos que ofrecían constantes piezoeléctricas mucho mayores a las de los materiales naturales. Desarrollaron las piezo-cerámicas de Titanio de Bario (BaTiO_3) y de Zirconato de Plomo (PZT). Los sistemas microeletromecánicos (MEMS) empezaron a ganar mucha importancia y se investigaron en profundidad para crear nuevos elementos y mejorar los ya existentes.

1965-1980: Los japoneses descubrieron el Fluoruro de polivinilideno (PVDF), un polímero con un gran efecto piezoeléctrico y mucho más flexible que los materiales descubiertos hasta entonces. Este material tuvo un gran éxito comercial y se utilizó para desarrollar nuevas tecnologías gracias a que no suponía limitaciones relacionadas con la rigidez. [6][10][11][12]

2.2 Aplicaciones cotidianas del efecto piezoeléctrico

En la actualidad el efecto piezoeléctrico tanto directo como inverso es comúnmente utilizado en muchas de las tecnologías imprescindibles en el día a día. Se puede observar en ámbitos muy distintos como: la medicina, la biomedicina, la industria de la automoción, la industria aeronáutica, etc. A continuación, se citan brevemente algunos ejemplos convencionales de su aplicación. [12][15]

Encendedores/mecheros (Figura 3): La aplicación más utilizada diariamente, ya que también se produce el mismo efecto en otras tecnologías como, por ejemplo, las calderas y estufas. Al golpear el cristal piezoeléctrico se genera un arco eléctrico (chispa) que con el gas produce el fuego. Se produce el efecto piezoeléctrico directo.

Inyectores de combustible de motores (Figura 4): Se produce el efecto piezoeléctrico inverso en los inyectores situados en motores de combustión interna. Se aplica una diferencia de potencial que consigue abrir el inyector y permite que el combustible entre al motor a alta presión. Esta aplicación permite controlar con exactitud los tiempos de inyección y la cantidad de combustible, esto se traduce en una reducción del consumo y un mayor rendimiento del motor.

Nano-posicionadores: Los actuadores piezoeléctricos tienen una gran resolución, son capaces de producir cambios de posición con mucha precisión (por debajo del rango del nanómetro) al aplicar pequeños cambios en el voltaje de operación. A su vez también pueden hacerse servir como micro-dispensadores en el ámbito de la medicina.

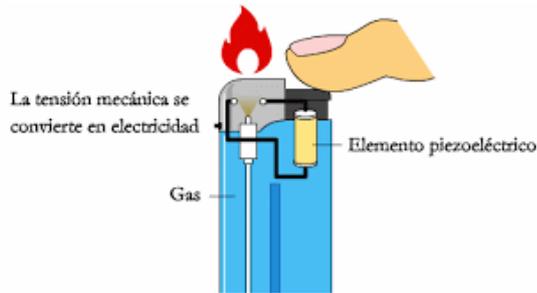


Figura 3. Funcionamiento del efecto piezoeléctrico en un encendedor. Obtenido de [15]



Figura 4. Funcionamiento del efecto piezoeléctrico en un inyector de combustible. Obtenido de [16]

2.3 Piezoelectricidad y *energy harvesting* en la actualidad

Éstos últimos años se han realizado gran cantidad de estudios e investigaciones con el objetivo de aplicar el uso de los materiales piezoeléctricos en los sistemas *energy harvesting*. Se ha estudiado la implantación de piezoeléctricos en prótesis de cadera o rodillas, en la suela del calzado, en arterias, etc.

A continuación, se exponen brevemente algunos de los proyectos que se han llevado a cabo en estos años y están relacionados con el ámbito de aplicación de este trabajo, es decir, la aplicación de piezoeléctricos en las vías, ya sean de viandantes o automóviles.

Sustainable Dance Floor & Club4Climate

Empresa conocida antiguamente como *Sustainable Dance Club*. Invirtieron en un proyecto que consistía en hacer que los clubs de baile (discotecas) fuesen ecológicos y sostenibles. Para ello realizaron una prueba en una discoteca llamada *Club Watt* situada en Rotterdam (Holanda), la idea principal del proyecto era incorporar sensores piezoeléctricos en las baldosas de la discoteca, de forma que se generase energía gracias a las personas que bailaban sobre ellas.



Figura 5. Suelo con baldosas piezoeléctricas en el Club Watt (Rotterdam) Obtenido de [17]

La energía generada se utilizaba para alimentar las luces LED de la pista de baile. La compañía aseguró que cada módulo con un tamaño de 75x75x20 cm podía llegar a generar 35 W, aproximadamente entre 5 y 20 W por persona.

Otra compañía llamada *Club4Climate* realizó el mismo proyecto en la discoteca *Surya* de Londres. El sistema recargaba una serie de baterías conectadas al suelo que conjuntamente proporcionaban un 60% de la energía consumida para iluminar y sonorizar el local. [17][18][19]

East Japan Railway Company (JR East)

La compañía japonesa de trenes se propuso demostrar la eficiencia del sistema “*Power-generating floor*”, que igual que los anteriores, se basa en la generación de energía a partir de las vibraciones creadas por los viandantes.

En 2006 instalaron materiales piezoeléctricos en la estación de Marunouchi (Tokio) a lo largo de una superficie de 6m² repartida por las puertas de entrada/salida de la estación. La generación de energía obtenida era de unos 10 kW en un día (equivalente a la energía necesaria para encender una bombilla de 100W durante 100 segundos). Con el paso de las semanas la cantidad generada de energía disminuyó a causa de la degradación del material.

En 2008 realizaron una segunda prueba en la estación de Yaesu (Tokio) y en una superficie de 90m² repartida por las puertas de entrada/salida, las escaleras y el vestíbulo. Con la realización de esta segunda prueba pretendían cumplir el objetivo de producir 500 kW (equivalente a la energía necesaria para encender una bombilla de 100W durante 8 minutos). [20]



Figura 6. Instalación de baldosas piezoeléctricas en la estación de Tokio. Obtenido de [21]

Pavegen System

Empresa inglesa fundada por Laurence Kembell-Cook el año 2009. La empresa en su totalidad se ha dedicado al estudio, diseño y fabricación de baldosas piezoeléctricas con el objetivo de aprovechar i recolectar la energía generada por los pasos de los viandantes.

Actualmente han realizado más de 200 instalaciones en ciudades de todo el mundo, colocando las baldosas en zonas estratégicas y concurridas como aeropuertos, escuelas, estaciones de tren, centros comerciales, etc. Los proyectos realizados han tenido tanto duradas permanentes como temporales, generalmente, los proyectos temporales han sido realizados en eventos organizados por otras empresas con el objetivo de promocionarse.

Pavegen ha realizado proyectos muy atractivos como, por ejemplo, la implantación de 176 baldosas en el tramo final de la Maratón de París en 2003 o la implantación de baldosas en la estación de metro de West Ham (Londres) durante la realización de los Juegos Olímpicos del 2012.

En el ámbito técnico, las baldosas son resistentes al agua, son constituidas por un 80% de polímeros reciclados como, por ejemplo, goma de neumáticos, lo que las convierte también en reciclables. El último modelo diseñado se es capaz de generar aproximadamente 5W de potencia continua al caminar sobre cada una de las baldosas, que se desplazan verticalmente entre 5 y 10mm. El 5% de la energía obtenida la utilizan las propias baldosas, mientras que el 95% puede ser recolectada o utilizada directamente para alimentar dispositivos como por ejemplo pantallas LED.

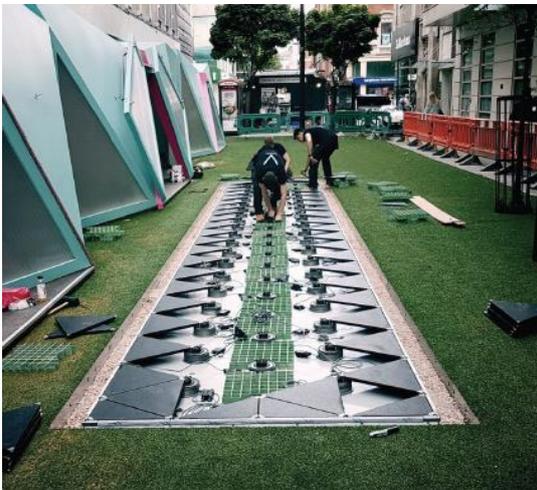


Figura 7. Instalación de baldosas Pavegen en Oxford Street. Obtenido de [47]



Figura 8. Resultado de las baldosas Pavegen en Oxford Street. Obtenido de [47]

Innowattech

Empresa Israelí que desarrolló un método de generación de energía a través de la energía mecánica producida por automóviles y trenes a partir de generadores piezoeléctricos instalados en las carreteras, autopistas y vías de tren. La idea principal de la empresa era utilizar la energía generada para iluminar las vías en que estaban situadas los generadores.

En 2009 realizaron una prueba piloto en las carreteras de Israel, desafortunadamente no hay evidencias de que los resultados obtenidos fuesen los deseados y posteriormente tampoco realizaron proyectos similares.

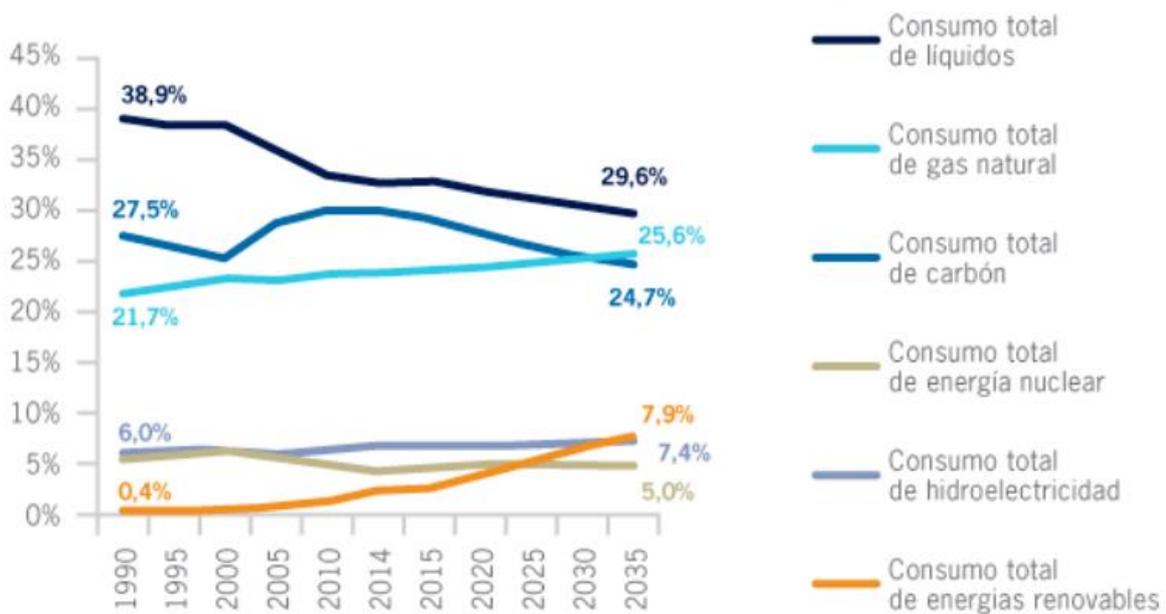


Figura 10. Porcentaje por tipos de energía del año 1990 al 2035. Obtenido de [4]

La energía producida por los sistemas de *energy harvesting* se almacena o se utiliza para alimentar pequeños dispositivos eléctricos/electrónicos (autónomos e inalámbricos) de bajo consumo y potencia, como, por ejemplo: los dispositivos utilizados en aparatos electrónicos portátiles, en ordenadores y en redes de sensores inalámbricos. La utilización de los sistemas *energy harvesting* puede resultar atractiva para distintos ámbitos: implantes biomédicos, dispositivos de vigilancia militar, estaciones meteorológicas remotas, auriculares bluetooth, sistemas integrados en estructuras, etc. [5]

Esta nueva tecnología permite reducir el uso de pilas y baterías, que aparte de ser contaminantes, tienen tiempos de vida cortos, por lo tanto, acaban suponiendo un gran coste económico. La tecnología *energy harvesting* no sólo puede substituir el uso de baterías, sino que también puede emplearse para recargarlas, aporta una autonomía prácticamente ilimitada a los sistemas en los que se instala y además se puede utilizar en sistemas situados en lugares de difícil acceso, reduciendo así diversos costes de instalación. [1][2]

La energía procedente de los sistemas *energy harvesting* puede ser almacenada en capacitores, supercapacitores y baterías. Cuando el dispositivo requiere un flujo constante de energía a largo plazo, se utilizan las baterías recargables. Por otro lado, los capacitores y supercapacitores aplican pulsos cortos de energía, por lo tanto, son preferibles para dispositivos que requieren cubrir una carga rápida. [9]

2.4.1 Clasificación de los sistemas *energy harvesting*

A continuación, se enumeran y explican las 5 principales fuentes de energía que se aprovechan para realizar sistemas *micro-energy harvesting*: [6][7]

1. **Radiante:** Aprovechan la energía electromagnética y óptica (radiación solar). Se utilizan dispositivos como células fotovoltaicas, bobinas de inducción y antenas.
2. **Mecánica:** Proviene de la energía cinética, energía proveniente de la presión, las vibraciones y diversas actividades humanas. Se transforma mediante transductores electromecánicos como los piezoeléctricos, electrostáticos e inductivos.
3. **Térmica:** Depende de los gradientes de temperatura. Se utilizan transductores como los piroeléctricos y termoeléctricos.
4. **Magnética:** Disponible alrededor de conductores eléctricos, imanes y máquinas eléctricas rotativas (motores y generadores). Se convierte la energía mediante el uso de bobinas e imanes, gracias a la ley de Faraday.
5. **Bioquímica:** Son fruto de las reacciones electroquímicas. Se puede extraer mediante pilas de combustible, aunque se ha comprobado que tienen muy baja eficiencia.

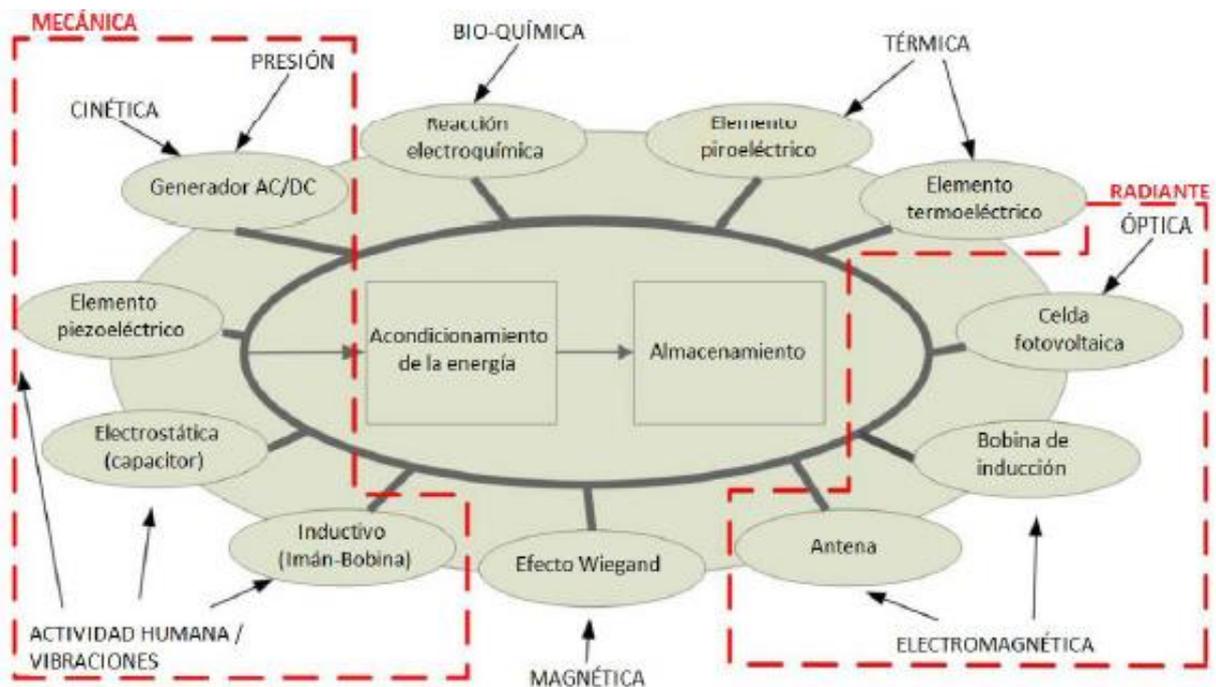


Figura 11. Fuentes de energía aprovechada por el "energy harvesting" y sus respectivos transductores para convertirla en energía eléctrica. Obtenida de [6]

La potencia transferida a los dispositivos electrónicos viene limitada por: la energía bruta que va a ser aprovechada y la eficiencia del transductor y el circuito de conversión.

Durante la utilización de la energía recolectada por los transductores, se pueden dar dos circunstancias: [7]

1. La energía consumida por el dispositivo eléctrico es inferior al promedio de energía recolectada por el transductor. En este caso, el dispositivo electrónico funcionará continuamente sin interrupciones.
2. La energía consumida por el dispositivo eléctrico es superior al promedio de energía recolectada por el transductor. En este caso, la operación será discontinua y el tiempo entre operaciones dependerá del almacenamiento de energía del dispositivo.

A continuación, se muestra un esquema en el que se puede observar a groso modo las distintas fases por las que pasa un proceso de *energy harvesting*:

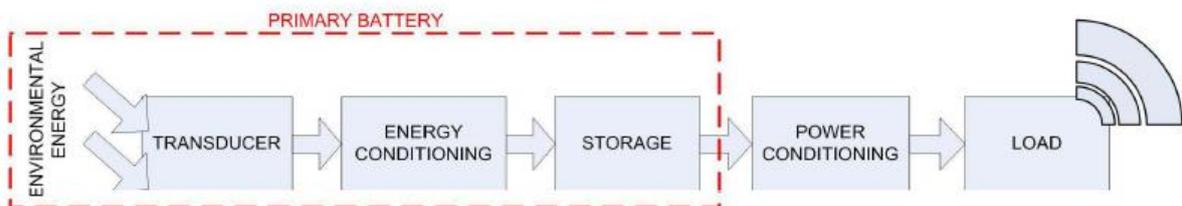


Figura 12. Diagrama de bloques del funcionamiento de un sensor autónomo gracias al *energy harvesting*. Obtenido de [7]

A continuación, se muestra una predicción del mercado global de los distintos dispositivos *energy harvesting* del año 2014 hasta el 2020. Se esperaba un significativo crecimiento del mercado de los elementos piezoeléctricos y termoeléctricos a partir del año 2016/2018. Se espera este crecimiento exponencial para los elementos piezoeléctricos y termoeléctricos porque son dispositivos fiables, eficientes y tienen una buena potencia de salida en relación al tamaño y coste del transductor. [8]

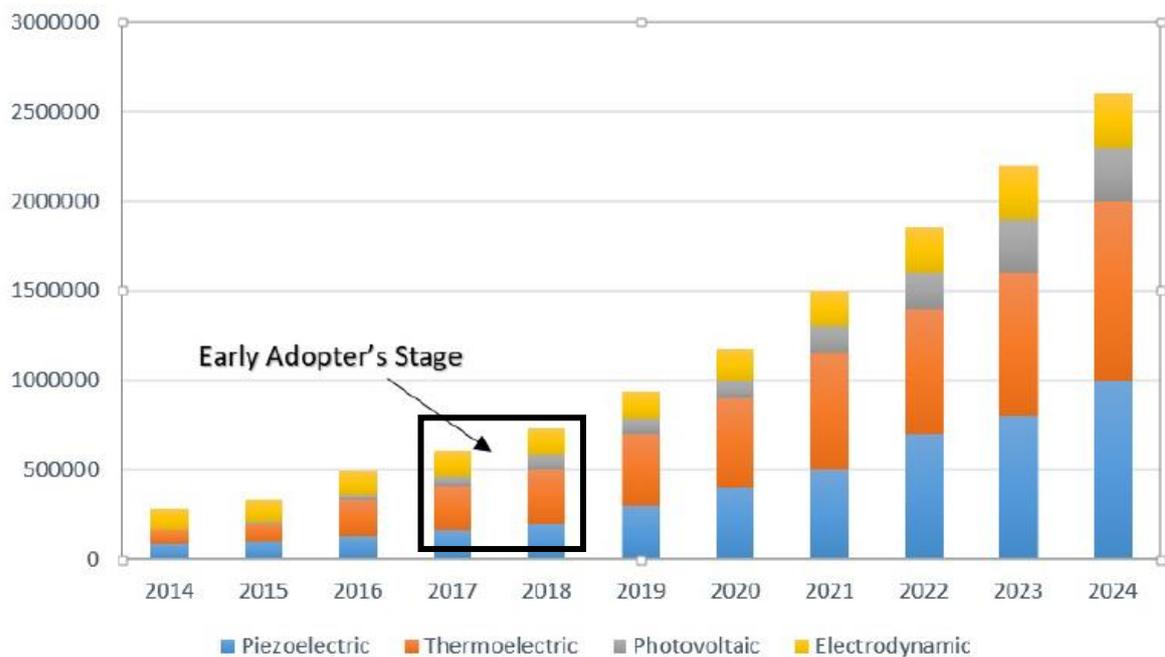


Figura 13. Predicción del mercado global de las *energy harvesting* en miles de \$. Desde el año 2014 al 2024. Obtenido de [8]

2.5 Piezoelectricidad

Parte de la energía liberada por los vehículos (15-21%) es transferida a sus neumáticos i en consecuencia al pavimento. Teniendo en cuenta la abundancia de vehículos en las ciudades desarrolladas, asumimos que hay una gran cantidad de energía que está siendo desaprovechada. Por lo tanto, las carreteras representan una fuente de energía considerable, que se puede convertir en energía eléctrica gracias a materiales piezoeléctricos y ser utilizada o almacenada posteriormente. [22]

A lo largo de este apartado se explicarán los conceptos teóricos básicos de la piezoelectricidad.

2.5.1 Sensores, actuadores y transductores

Un **sensor** es un dispositivo capaz de detectar variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas. Por variables de instrumentación entendemos magnitudes físicas o químicas como, por ejemplo: La temperatura, la aceleración, la presión, la fuerza, la humedad, el pH, el movimiento, etc. [12]

Un **actuador** es un dispositivo que tiene como principio de funcionamiento la transformación de la energía hidráulica, neumática o eléctrica en acciones motrices. En conclusión, los actuadores funcionan de forma totalmente opuesta a los sensores. [12]

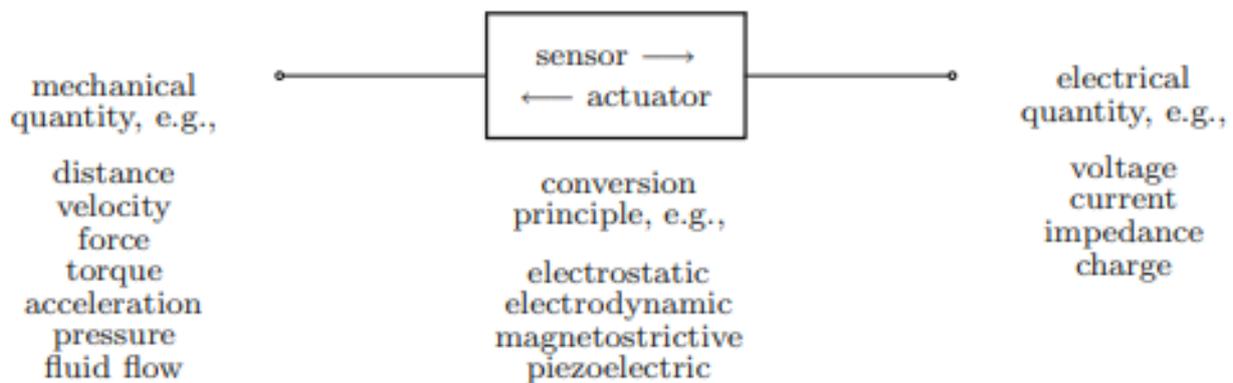


Figura 14. Principios de conversión bidireccional más comunes y diversos tipos de energías de entrada y salida. Obtenido de [12]

Cuando un principio de conversión permite trabajar en ambas direcciones, los sensores y actuadores utilizados son comúnmente llamados **transductores**. Es decir, un transductor es un dispositivo capaz de convertir una determinada energía de entrada, en otra diferente de salida. El mismo nombre del transductor indica qué transformación realiza, por ejemplo, un transductor electromecánico puede transformar una señal mecánica en eléctrica o viceversa. Se hace referencia a un elemento piezoeléctrico como transductor ya que es capaz de actuar en ambas direcciones. [12]

2.5.2 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico se basa en la interacción lineal que existe entre magnitudes de carácter mecánico y eléctrico. Cuando un material presenta una gran interacción, se le llama material piezoeléctrico.

Al aplicar una tensión mecánica sobre un material piezoeléctrico, se produce una deformación que consecuentemente genera un cambio microscópico en la polarización eléctrica del material, este efecto es conocido como **efecto piezoeléctrico directo**.

De forma contraria, al aplicar una tensión eléctrica sobre un material piezoeléctrico, se produce una deformación mecánica en el material, este efecto es conocido como **efecto piezoeléctrico inverso**. [12]

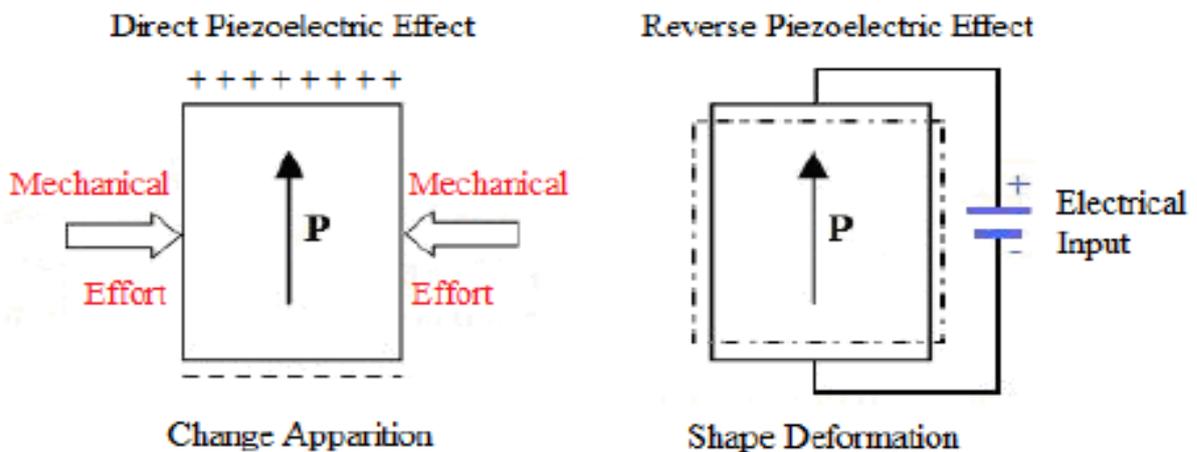


Figura 15. Efecto piezoeléctrico directo (Izqda.) y efecto piezoeléctrico inverso (Dcha.). Obtenido de [23]

Debido al efecto piezoeléctrico directo e inverso, los materiales piezoeléctricos requieren cambios continuos en su polarización eléctrica, por ello no tienen cargas eléctricas libres. Esto hace que sean materiales aislantes eléctricos, ya que sus cargas no pueden moverse con facilidad y por lo tanto son materiales que tienen escasa capacidad de conducción de la electricidad.

En la Figura 16, se observa una representación simplificada de la estructura interna de un cristal de cuarzo (SiO_2) en distintos estados para poder entender cómo se genera el efecto piezoeléctrico directo. A continuación, se explica con más detalle el proceso:

- a) (Figura 16 a) Se observa que la estructura de cuarzo está cubierta por electrodos en la superficie superior e inferior. La estructura se encuentra en su estado original en que Cq^+ (iones de Silicio) y Cq^- (iones de Oxígeno) coinciden geoméricamente. En consecuencia, el material se encuentra en un estado neutro eléctricamente, ya que no se genera ningún momento dipolar.

b) (Figura 16 b) El material se deforma longitudinalmente o transversalmente según la aplicación de una fuerza (F). Estas deformaciones mecánicas producidas en el material provocan que los centros de carga difieran geoméricamente el uno del otro, por lo tanto, surge la aparición de momentos dipolares eléctricos, que van de C_{q-} a C_{q+} . El momento dipolar es una medida cuantitativa de la polaridad de una molécula, por lo tanto, muchas veces se hace referencia a él como polarización. Por lo tanto, contra mayor sea la distancia geométrica entre los centros de carga (C_{q-} y C_{q+}), más polarización (P) tendrá el material. En este caso, el material se encuentra en un estado de desequilibrio eléctrico. Para compensar la polarización generada en el interior, las cargas son inducidas electrostáticamente por los electrodos y se generará un flujo de corriente, es decir, una corriente eléctrica.

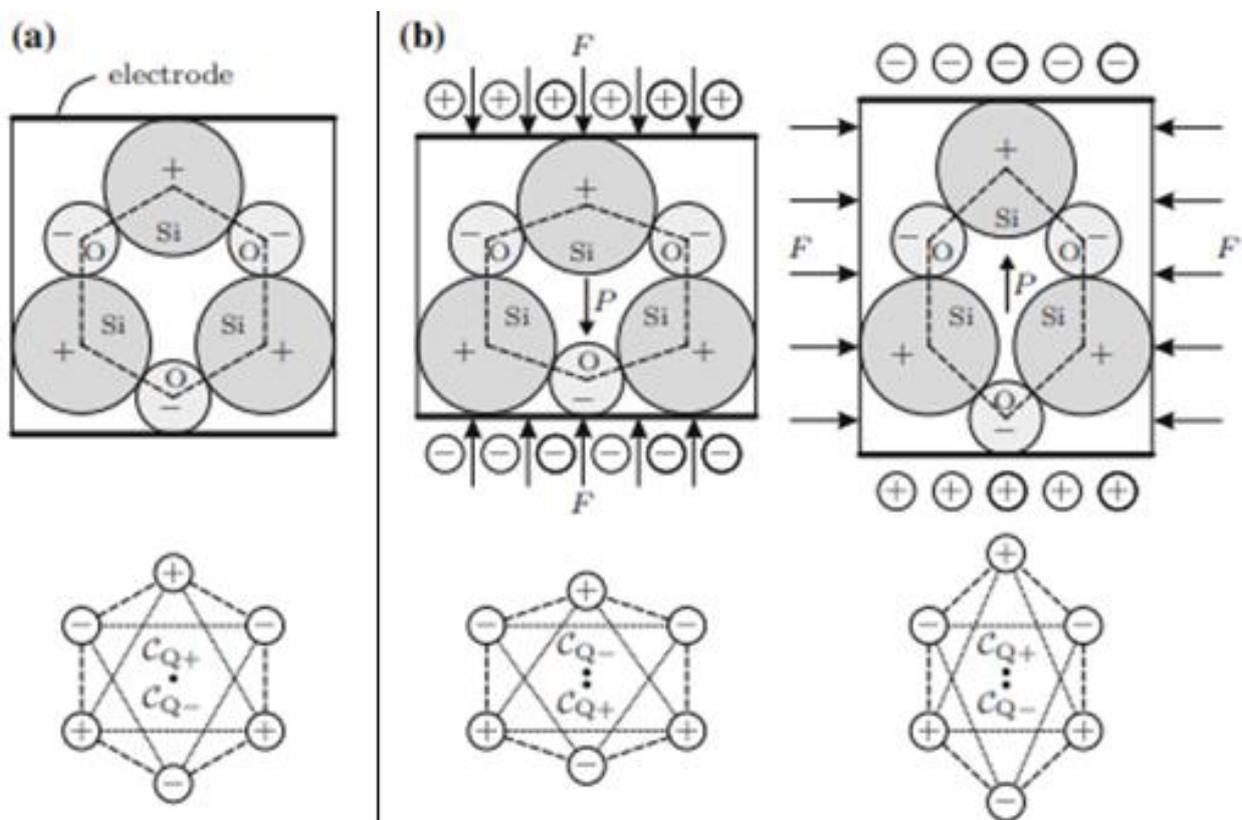


Figura 16. Estructura interna de un cristal de Cuarzo. a) Estado original, sin aplicación de tensión. b) Efecto piezoeléctrico directo debido a la aplicación de cargas en distintas direcciones. Obtenido de [12]

Durante el efecto piezoeléctrico inverso se ocasiona exactamente el mismo proceso, pero de forma inversa. Al aplicar una diferencia de potencial (voltaje) sobre los electrodos, las cargas serán eléctricamente inducidas sobre ellos. En este instante, el material vuelve a encontrarse en desequilibrio, que se deberá compensar con un momento dipolar interno, generado automáticamente por el mismo material. Dicho momento dipolar supondrá que las cargas positivas y negativas (C_{q+} y C_{q-}) difieran geoméricamente la una de la otra y, por lo tanto, se generará una deformación mecánica en el material piezoeléctrico. [12]

2.5.3 Materiales piezoeléctricos

Una de las principales características de los materiales piezoeléctricos es que la estructura cristalina debe carecer de centro de simetría, de esta forma se consigue la generación de momentos dipolares y en consecuencia una polarización que será la que provoque el efecto piezoeléctrico.

Actualmente, existen más de 200 materiales piezoeléctricos hechos con distintas combinaciones de materiales. La selección del material piezoeléctrico para una aplicación *energy harvesting* es muy importante, ya que, el voltaje generado dependerá directamente de las propiedades piezoeléctricas que tenga el material. [25][26]

Los materiales piezoeléctricos se pueden dividir según su naturaleza en: **naturales y sintéticos**.

Naturales

Grupo formado por los materiales que presentan propiedades piezoeléctricas de manera natural, sin necesidad de ser modificados, se encuentran en forma de minerales o cristales en la naturaleza.

La principal ventaja de los materiales naturales es que sus propiedades no varían en función del tiempo, pero son materiales que presentan un bajo efecto piezoeléctrico y por lo tanto son poco utilizados para aplicaciones *energy harvesting*.

Fueron los primeros materiales piezoeléctricos descubiertos y los más conocidos son el cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle (Sal de Saginette).

Sintéticos

Fueron descubiertos a posteriori de los materiales naturales y comúnmente se les conoce como materiales ferroeléctricos. Es necesario que los materiales ferroeléctricos se sometan a un proceso previo de polarización con el objetivo de aumentar sus propiedades piezoeléctricas.

Los materiales ferroeléctricos se pueden dividir en 4 grandes grupos según sus características estructurales: **Materiales monocristalinos, cerámicas policristalinas, polímeros y compuestos**.

Debido a la fuerte polarización de sus estructuras cristalinas, las cerámicas policristalinas y los materiales monocristalinos presentan mejores propiedades piezoeléctricas, pero, son más rígidos y frágiles frente a grandes tensiones mecánicas, hecho que los hace inadecuados para algunas aplicaciones

La selección del tipo de material piezoeléctrico para las aplicaciones *energy harvesting* no solo depende de las propiedades piezoeléctricas del material, también depende de los requisitos de diseño que impone el mismo sistema, por ejemplo: la frecuencia de aplicación, las máximas dimensiones, la forma en la que la energía mecánica alimenta el sistema, etc.

Materiales monocristalinos

Los materiales monocristalinos están formados por una red cristalina continua que no presenta bordes de grano a lo largo del material, esto los hace ser más frágiles que las cerámicas policristalinas. Los iones positivos y negativos se encuentran distribuidos de forma ordenada y simétrica por toda la estructura. Debido a su compleja fabricación son materiales que tienen un coste elevado. [25][26]

Los monocristales ferroeléctricos más utilizados por su mayor rendimiento son el niobato de níquel (PNN) y el titanato de plomo (PbTiO_3).

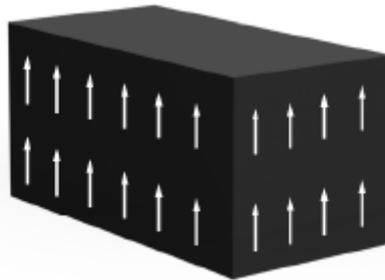


Figura 17. Estructura de un material monocristalino. Obtenido de [24]

Cerámicas policristalinas

Debido a su bajo coste, fácil incorporación y sus propiedades piezoeléctricas, son los más utilizados en el mundo de la piezoelectricidad y el *energy harvesting*. Las cerámicas policristalinas (o piezo-cerámicas) están compuestas por numerosos cristales ferroeléctricos que forman una estructura policristalina asimétrica.

Una de las principales ventajas de las cerámicas piezoeléctricas es que debido a su rigidez y ductilidad se pueden implementar fácilmente en láminas finas como, por ejemplo, una viga en voladizo (estructura más utilizada en los sistemas *energy harvesting*).

La piezo-cerámica más utilizada es el titanato Zirconato de plomo (PZT) debido a sus propiedades piezoeléctricas y su alta temperatura de Curie (temperatura crítica a partir de la que los materiales pierden su piezoelectricidad), que nos permite tener un mayor rango de operación antes de que el material pierda sus propiedades piezoeléctricas. [25][26]



Figura 18. Estructura de un material policristalino. Obtenido de [24]

Polímeros

Materiales a base de carbono, compuestos por largas cadenas de polímeros con muchas unidades estructurales repetidas llamadas “monómeros”.

Una gran ventaja respecto a los demás tipos de materiales piezoeléctricos es que son flexibles y se deforman fácilmente bajo el efecto de tensiones mecánicas, por lo tanto, presentan una gran resistencia a choques mecánicos y se pueden montar y adaptar fácilmente a superficies curvas.

El polímero más utilizado es el fluoruro de polivinilideno (PVDF), está formado por una matriz amorfa con un 50% de parte cristalina. [25][26]

Compuestos

En algunas aplicaciones se utilizan mezclas de los materiales anteriores con el objetivo de obtener propiedades que no tienen por separado. Los materiales que más se suelen mezclar son las piezo-cerámicas y los polímeros, ya que aportan más prestaciones que los demás. [25][26]

2.5.4 Fabricación y polarización de cerámicas piezoeléctricas

Tal y como se ha explicado anteriormente, las piezo-cerámicas están fabricadas sintéticamente y son materiales policristalinos que han sido sometidos a un proceso de polarización para que presenten características piezoeléctricas. [12][27][28]

El proceso de fabricación de las cerámicas policristalinas conlleva 6 etapas: **mezclado, calentamiento, conformado, aplicación de electrodos y polarización.**

Mezclado: Se mezclan los metales que componen el material en forma de polvos finos y con unas proporciones específicas.

Calentamiento: La mezcla se calienta y los materiales interactúan químicamente entre ellos hasta formar un polvo uniforme y homogéneo.

Conformado: El polvo obtenido se mezcla con aglutinante orgánico y se conforma. El proceso de conformado dependerá de la forma geométrica (disco, varilla, etc.) que se requiera según la aplicación. El proceso más utilizado es el conformado en frío.

Sinterización: La mezcla de polvos con la forma deseada se comprime a altas temperaturas con el objetivo de que los polvos se compacten y el material presente una estructura cristalina densa. Finalmente, se pule y corta el material en caso de que hayan quedado desperfectos para afinar la geometría. Al final de esta etapa se obtiene como material una cerámica no polarizada.

Justo después de sinterizar el material, obtenemos una cerámica formada por diversas regiones de cristales ferroeléctricos llamadas dominios, que muestran una estructura cristalina de perovskita. [12][27][28]

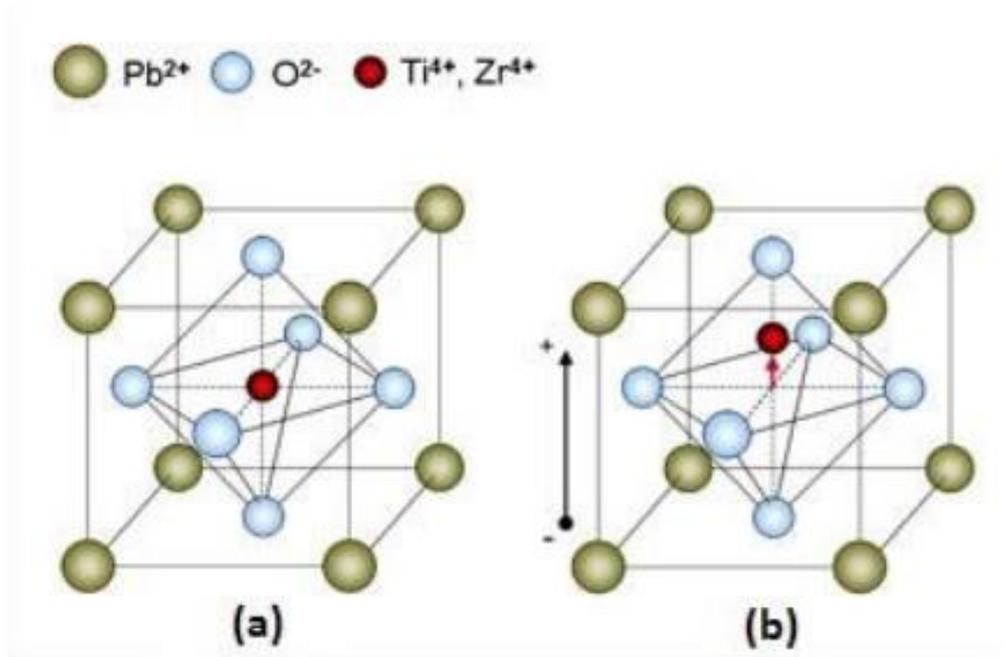


Figura 19. Estructura perovskita de una ceràmica piezoelèctrica. a) En estado neutro, b) Después de ser polarizada. Obtenido de [28]

Cada uno de los dominios que forman el material presenta momentos dipolares, es decir, están polarizados. Al estar distribuidos de forma aleatoria por todo el material, presentan distintas direcciones de polarización y, por lo tanto, el material es isotrópico y la polarización total del material es nula, ya que no existe ninguna dirección preferente. [12][27][28]

Aplicación de electrodos: Se añaden los electrodos en las superficies pertinentes para posteriormente poder aplicar un campo eléctrico durante el proceso de polarización.

Polarización: Es el proceso que se le realiza a un material ferroeléctrico para que adquiera propiedades piezoeléctricas. (Figura 20)

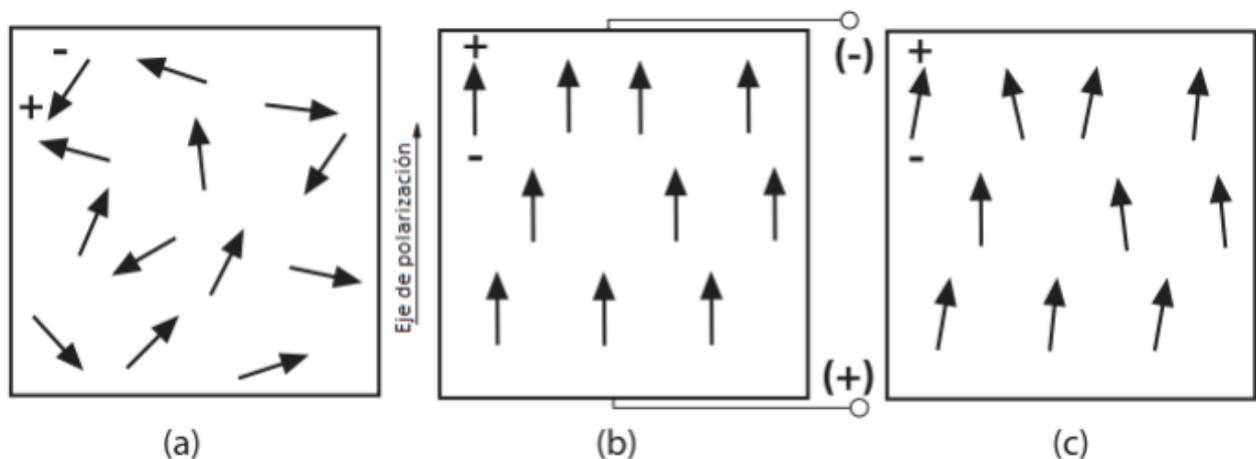


Figura 20. Proceso de polarización de una ceràmica piezoelèctrica. a) Los dominios están desordenados y la polarización global es nula. b) Se aplica un campo eléctrico que alinea los dominios. c) Se quita el campo eléctrico alineado y los dominios permanecen alineados (polarización remanente). Obtenido de [6]

Para realizar el proceso de polarización, se somete el material a altas temperaturas cercanas a la temperatura de Curie (sin sobrepasarla) de forma que las moléculas fluyan y se muevan libremente. Durante el calentamiento de la pieza, se aplica un fuerte campo eléctrico que provoca que los dipolos del material se alineen en la dirección de aplicación del mismo. Posteriormente, se enfría lentamente y finalmente se retira el campo eléctrico. En este punto el material alcanza la polarización remanente, es decir, el material sigue estando polarizado una vez se le deja de aplicar el campo eléctrico. [12][27][28]

Las propiedades adquiridas son reversibles, ya que, si se somete el material a temperaturas superiores a la temperatura de Curie, se despolariza y pierde sus propiedades piezoeléctricas.

2.5.4.1 Histéresis ferroeléctrica

La histéresis ocurre cuando se le induce una propiedad a un material y ésta sigue permaneciendo después de eliminar el estímulo que la ha generado. Un claro ejemplo de histéresis sería la nombrada anteriormente polarización remanente, este proceso se conoce como histéresis ferroeléctrica. [12][29]

En la figura 21 se observa el ciclo de histéresis de un material ferroeléctrico al aplicarle un campo eléctrico E . Se muestra el efecto del E sobre la alineación de los dipolos y por consecuencia la polarización del material. [12]

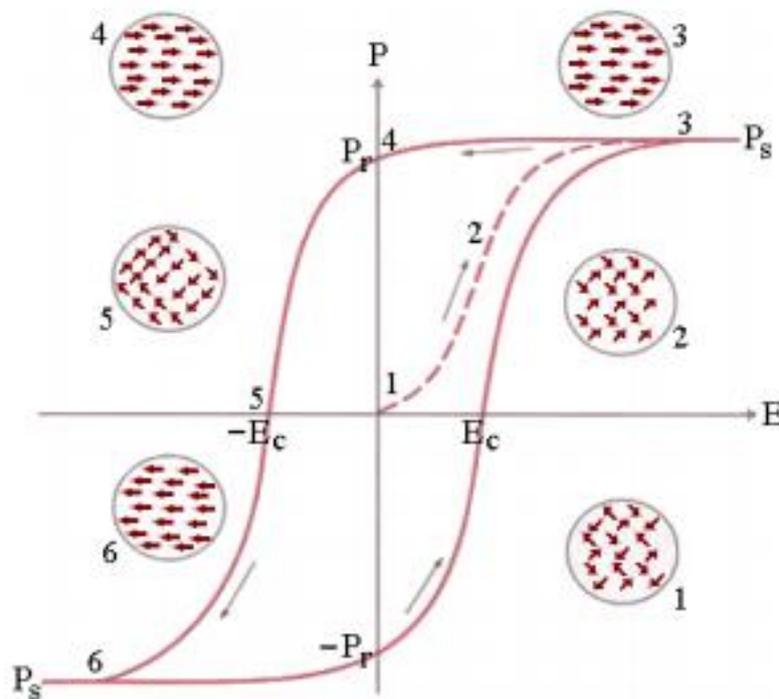


Figura 21. Ciclo de histéresis ferroeléctrica. Obtenido de [29]

Punto 1: El material tiene una polarización nula, ya que los dipolos están orientados de forma aleatoria.

Punto 2: Se aplica y aumenta progresivamente el E y los dipolos empiezan a alinearse en la dirección del mismo.

Punto 3: El material llega a su máxima polarización o polarización de saturación (P_s).

Punto 4: Al reducir el campo eléctrico hasta llegar a $E=0$, los dipolos permanecen alineados y el material presenta una polarización remanente (P_r).

Punto 5: Si el campo se aumenta en la dirección opuesta a la anterior ($-E_c$, campo coercitivo), los dipolos se desorientan y el material vuelve a presentar polarización nula.

Punto 6: Si se sigue aumentando el campo en la misma dirección ($-E_c$) se llega a la polarización de saturación (P_s). Los dipolos del material se encuentran perfectamente alineados como en el punto 3, pero en dirección contraria. Al reducir el campo $E=0$, se llega a la polarización remanente negativa ($-P_r$). Si se vuelve a aplicar un campo eléctrico E en la dirección inicial del proceso, se consigue cerrar el ciclo de histéresis. [12]

2.5.5 Constantes piezoeléctricas

Las cerámicas piezoeléctricas polarizadas son materiales anisotrópicos, es decir, sus constantes varían en función de la dirección de las tensiones-deformaciones mecánicas y las fuerzas eléctricas, independientemente de cuales sean las aplicadas o las generadas. Es por ello, que las constantes piezoeléctricas van acompañadas de dos subíndices que indican la dirección de las fuerzas. [28][30][31]

Los subíndices adquieren valores del 1 al 6 y se enumeran según el sistema de referencia de la figura 22. Se observa que los subíndices 1, 2 y 3 hacen referencia a la dirección de los ejes X, Y, Z del material piezoeléctrico, mientras que la cizalladura o torsión producida en estos mismos ejes se representa con los subíndices 4, 5 y 6 respectivamente.

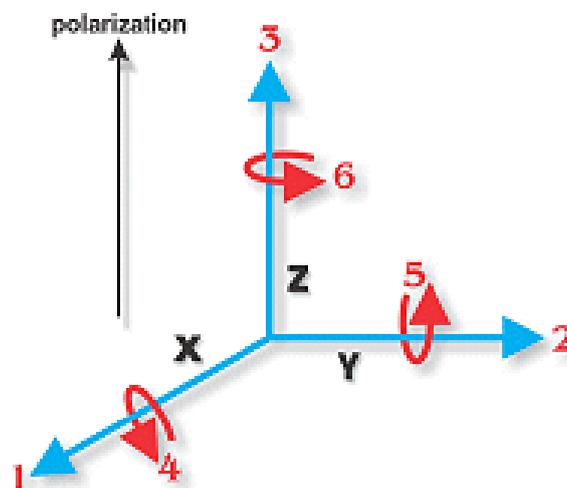


Figura 22. Dirección de fuerzas aplicadas/producidas en una cerámica piezoeléctrica. Obtenido de [31]

Generalmente, el primer subíndice indica la dirección de aplicación del campo eléctrico y el segundo subíndice la de la deformación mecánica. Se debe tener en cuenta que, tal y como se muestra en la figura 22, la dirección de polarización positiva de las cerámicas piezoeléctricas se hace coincidir con el eje Z dentro del sistema ortogonal de ejes X-Y-Z.

Algunas de las constantes también tienen superíndices que indican condiciones especiales en las que se miden. Estos super índices pueden ser los siguientes:

- S: Hace referencia a constantes medidas con deformaciones constantes.
- T: Hace referencia a constantes medidas con tensiones constantes.
- E: Hace referencia a condiciones de campo eléctrico constantes.
- D: Hace referencia a condiciones de desplazamiento eléctrico constantes.

A continuación, se explican algunas de las principales constantes piezoeléctricas:

Constante de carga piezoeléctrica (d_{ij})

También conocida como constante de deformación piezoeléctrica. Relaciona la variación dimensional (Δl) del material piezoeléctrico (metros) con la diferencia de potencial aplicada (Volts). También se utiliza para relacionar la generación de las cargas eléctricas (Coulombs) y la fuerza aplicada en el material (Newtons). En otras palabras, indica la polarización generada por unidad de tensión mecánica (T) aplicada al material piezoeléctrico. O contrariamente, indica la deformación mecánica (S) experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de campo eléctrico aplicado.

Las unidades de medida de la constante son m/V o C/N.

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

Dónde:

S: Deformación mecánica producida en el piezoeléctrico.

$$S = \frac{l - l_0}{l_0}$$

E: Campo eléctrico aplicado, expresado en V/m.

σ : Densidad de carga, expresada en C/m².

T: Tensión mecánica aplicada, expresada en N/m².

Constante de tensión piezoeléctrica (g_{ij})

También conocida como constante de voltaje piezoeléctrico. Informa sobre la proporción entre la diferencia de potencial generada (Volts) y la fuerza aplicada (Newtons) en una cerámica de 1 metro de longitud. En otras palabras, indica el campo eléctrico generado por un material piezoeléctrico por unidad de presión mecánica (T). O contrariamente, indica la deformación mecánica (S) por unidad de densidad de carga aplicada.

Las unidades de medida de la constante son Vm/N.

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

Coefficiente de acoplamiento electromecánico (k_{ij})

Indica la eficacia con la que el material piezoeléctrico convierte energía mecánica en eléctrica y viceversa. Las expresiones para calcular el coeficiente de acoplamiento electromecánico dependen de las dimensiones y geometría del material piezoeléctrico. Pese a ello, la ecuación comúnmente utilizada para determinar el coeficiente de acoplamiento es la siguiente:

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

Para las cerámicas piezoeléctricas (PZT) adquiere valores entre 0,02 y 0,75, que equivalen a un 2% y 75% de eficiencia.

La constante no tiene unidades de medida, es adimensional.

Factor de calidad mecánico (Q)

El factor de calidad mecánico indica el amortiguamiento del material piezoeléctrico.

Es una constante que no tiene unidades de medida, es adimensional.

Factor de disipación piezoeléctrico ($\tan \delta$)

En una cerámica piezoeléctrica el factor de disipación piezoeléctrica indica las pérdidas dieléctricas del material.

Es un factor adimensional.

Temperatura de Curie (T_c)

Indica la temperatura en que el material pierde todas sus propiedades piezoeléctricas. Si se sobrepasa esta temperatura, el material piezoeléctrico pierde la polaridad remanente que se le había inducido mediante el proceso de polarización, y consecuentemente, deja de ser útil como transductor de energía.

Las unidades de medida de la constante son °C.

Constantes de frecuencia (N)

Relaciona la frecuencia de resonancia de un material piezoeléctrico con sus dimensiones y geometría. Es una constante importante, ya que, permite estimar la frecuencia de resonancia (f_r) que tendrán los dispositivos piezoeléctricos.

La unidad de medida de las constantes es Hz·m.

Impedancia acústica (Z)

Indica la forma en que la energía mecánica se propaga por el medio dependiendo del material piezoeléctrico utilizado. Esta propiedad es equivalente a la del índice de refracción.

La unidad de medida de la constante son MRayls ($\text{kg/m}^2\text{s}$).

Constante dieléctrica o permitividad (ϵ)

Ésta constante no es propia solamente de materiales piezoeléctricos. La permitividad indica la capacidad de los materiales a permitir el desplazamiento dieléctrico unitario en presencia de un campo eléctrico.

Módulo de Young (Y)

Al igual que la anterior constante, el módulo de Young no es exclusivo de los materiales piezoeléctricos. Indica el comportamiento de un material elástico en función de la dirección de aplicación de una fuerza. Es decir, relaciona la deformación producida en los materiales respecto a la tensión a la que se someten. Cuando el comportamiento del material es perfectamente elástico y, por lo tanto, la relación esfuerzo-deformación es lineal, el módulo de Young se obtiene partir de la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{T}{S}$$

2.5.6 Modos de operación piezoeléctricos

Existen diversas formas de excitar un material piezoeléctrico. Por ello, se pueden distinguir diversos modos de operación en función de la dirección de la tensión aplicada y la dirección del campo eléctrico generado. Para nombrar los modos piezoeléctricos se suele utilizar la constante de carga piezoeléctrica (d). [24][32][33][34]

A continuación, se exponen los principales modos de funcionamiento piezoeléctrico:

Modo d_{33}

En el modo d_{33} el material se encuentra sujeto a una tensión mecánica aplicada en la misma dirección que el campo eléctrico generado, concretamente en la dirección 3 (eje z). (Figura 26)

Generalmente, los materiales piezoeléctricos que trabajan en este modo presentan mayores coeficientes de acoplamiento (k), que los que trabajan en el modo d_{31} . Pese a ello, los dispositivos que funcionan en el modo d_{31} son mucho más utilizados en sistemas *energy harvesting*, ya que tienen un diseño mucho más sencillo.

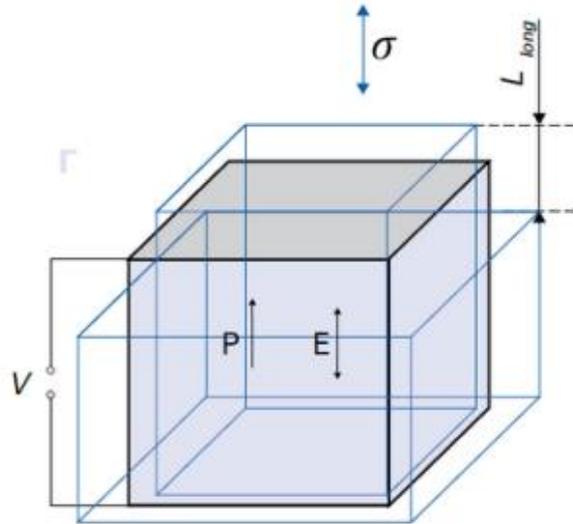


Figura 23. Modo de operación d_{33} . Obtenido de [28]

Modo d_{31}

En este modo, los materiales están sometidos a una tensión mecánica aplicada en la dirección 1 (eje x) y consecuentemente, se genera un campo eléctrico en la dirección 3 (eje z). Por lo tanto, la dirección de la fuerza aplicada es perpendicular a la dirección del campo eléctrico generado (Figura 23). Todos los dispositivos que trabajan en este modo, lo hacen a compresión o tracción simple a lo largo del eje X.

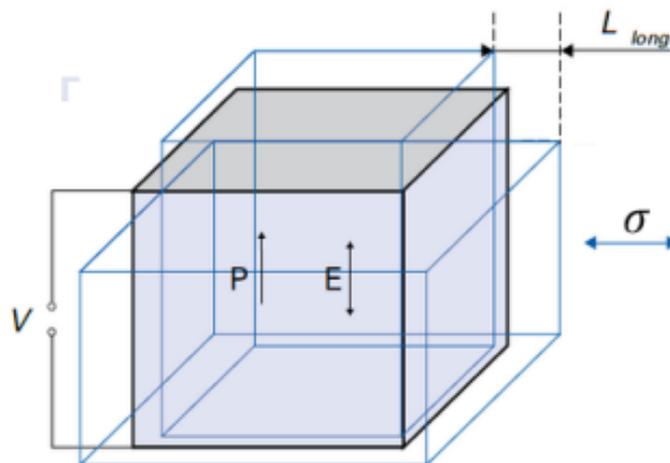


Figura 24. Modo de operación d_{31} . Obtenido de [28]

La mayoría de transductores piezoeléctricos utilizados en sistemas *energy harvesting* utilizan la estructura básica de una viga en voladizo, que funciona con el modo d_{31} . Por definición, esta estructura consta de una viga rectangular que se encuentra encastrada por uno de sus extremos, gracias a su propio peso flexa y oscila, produciendo compresión en una de las superficies del material piezoeléctrico y tracción en la otra, por lo tanto, las tensiones mecánicas transmitidas al material permitirán que este genere un campo eléctrico.

Al añadir una masa en el extremo libre de la viga, se reduce la frecuencia de resonancia y se producen mayores desviaciones en la flexión en la viga, hecho que genera mayores tensiones mecánicas sobre el material piezoeléctrico y, consecuentemente, un mayor voltaje de salida.

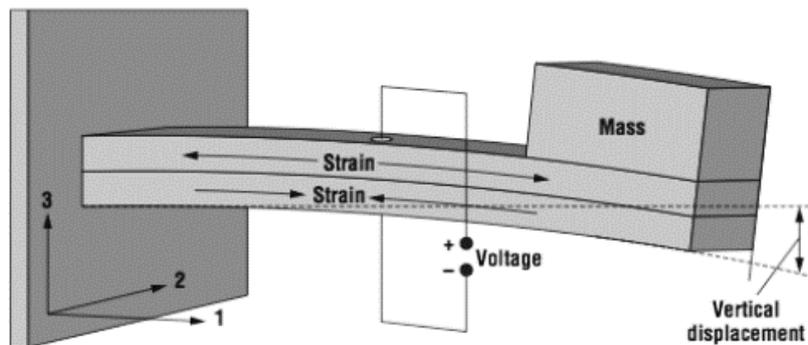


Figura 25. . Estructura de viga en voladizo (El dispositivo trabaja con el modo d_{31}).
Obtenido de [24]

El modo d_{31} ha sido profundamente estudiado y se han desarrollado diversas configuraciones en el diseño de la viga en voladizo que optimizan la captación de energía: [24][33][34]

- **Configuración bimorfa:** El dispositivo se basa en una placa metálica o viga situada entre dos capas finas de material piezoeléctrico. Esta configuración extrae una mayor cantidad de energía cuando trabaja sometida a elevadas cargas y frecuencias. Ambas piezas de material piezoeléctrico están sometidas a una tensión mecánica de igual intensidad durante su funcionamiento. La principal diferencia es que cuando una trabaja a tracción, la otra lo hace a compresión.
Las dos piezas generan el mismo valor de voltaje en sentido contrario, por lo tanto, se pueden unir eléctricamente en serie (para aumentar el voltaje de salida. Figura 25a) o en paralelo (para aumentar la corriente de salida. Figura 25b).
- **Configuración unimorfa:** El dispositivo consta de una placa metálica o viga en la que se sitúa una capa fina de material piezoeléctrico (Figura 25c). Esta configuración produce una mayor cantidad de energía cuando trabaja sometida a pequeñas cargas y frecuencias.

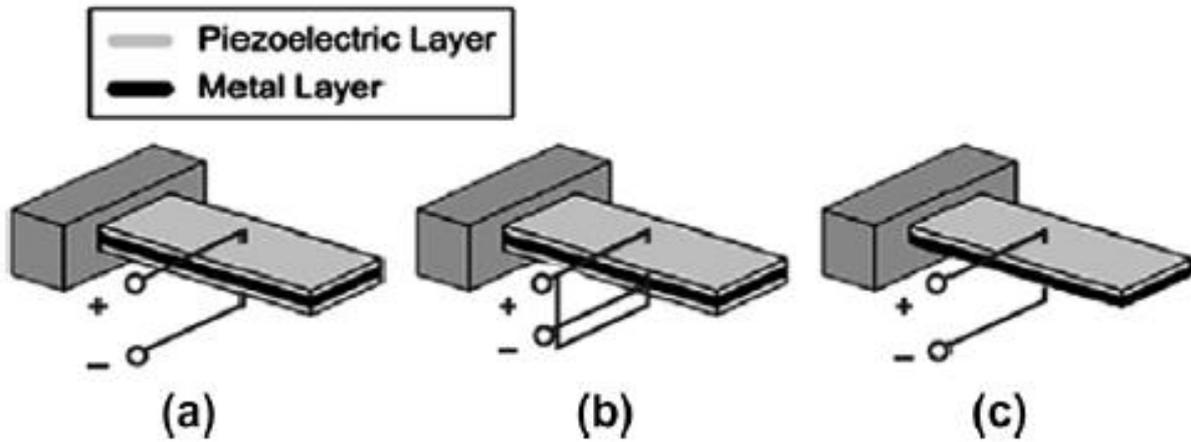


Figura 26. a) Configuración bimorfa conectada en serie. b) Configuración bimorfa conectada en paralelo. c) Configuración unimorfa. Obtenido de [33]

Modo d_{15}

Este modo es característico de los dispositivos que están sometidos a una tensión de cizalla. El material está sujeto a una tensión de cizalla en la dirección 3 y el campo eléctrico se genera en la dirección 1 (eje x). En este caso, la señal eléctrica obtenida es perpendicular a la dirección de polarización positiva y a la tensión mecánica aplicada. El principal problema de esta configuración está relacionado con la perpendicularidad que existe entre el campo eléctrico obtenido y la polarización, ya que, obliga a utilizar un conjunto de electrodos para la polarización y otro distinto para la operación.

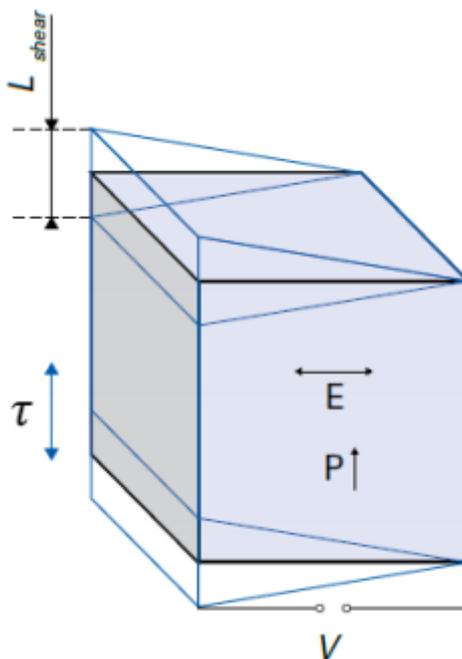


Figura 27. Modo de operación d_{15} . Obtenido de [28]

2.5.7 Ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad

Las ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad relacionan tensiones, deformaciones y comportamiento eléctrico a partir de combinar ecuaciones de la mecánica y la eléctrica. [35]

La relación entre la tensión mecánica y la deformación en un material, se puede definir a partir de la Ley de Hooke:

$$S = s * T \quad \text{Eq. (1)}$$

Dónde:

S: Deformación mecánica producida en el piezoeléctrico. [adimensional]

s: Coeficiente de elasticidad, es la inversa del módulo de Young. [m²/N]

T: Tensión mecánica aplicada. [N/m²]

Por otro lado, el comportamiento lineal eléctrico de un material se describe con la siguiente ecuación del electromagnetismo:

$$D = \varepsilon * E \quad \text{Eq. (2)}$$

Dónde:

D: Densidad de flujo eléctrico. [C/m²]

ε : Constante dieléctrica o permitividad [F/m]

E: Campo eléctrico [V/m]

Ambas ecuaciones se pueden combinar, obteniendo así las ecuaciones constitutivas de la piezoelectricidad, considerando la relación entre cargas y deformaciones:

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d^T]\{E\} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\varepsilon^T]\{E\} \quad \text{Eq. (4)}$$

Dónde:

d: Constante de carga piezoeléctrica [m/V] o [C/N]

Superíndice E: Indica que la magnitud se encuentra bajo un campo eléctrico constante o nulo.

Las ecuaciones 3 y 4 pueden transcribirse en forma matricial:

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

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

2.5.8 Geometría de los transductores piezoeléctricos

En ese apartado se explicarán las geometrías más utilizadas de transductores piezoeléctricos, derivadas de la estructura de viga en voladizo, y que, por lo tanto, trabajan principalmente en el modo d_{31} . [25][32][36][37]

Cuando un material piezoeléctrico se ubica en lugares sometidos a grandes tensiones, se utilizan estructuras metálicas, generalmente hechas de acero, ya que, tiene un mayor límite elástico que el latón y el aluminio y, por lo tanto, permite que el transductor tenga una mayor resistencia a la aplicación de cargas elevadas. Además, este tipo de transductores tienen mayores duraciones y permiten más ciclos de trabajo que la configuración de la viga en voladizo, que se encuentra sometida a vibraciones y flexiones continuamente y se debilita con el paso del tiempo.

Generalmente, estas estructuras están compuestas por un diseño muy simple, que consta de dos tapas metálicas que se acoplan tanto a la cerámica piezoeléctrica como al medio circundante (en este caso, pavimento). De esta forma, las tapas metálicas transmiten al material piezoeléctrico las tensiones y deformaciones que se producen en el pavimento. Los transductores que funcionan sometidos a tracción, provocan tracción y contracción al material piezoeléctrico. Los más comunes y que además se suelen estudiar para su implantación en el pavimento son: **Moonie**, **Cymbal** y **Bridge**.

Los tres tipos de transductores nombrados anteriormente se basan en el mismo diseño, la cerámica piezoeléctrica se sitúa entre dos tapas de metal que tienen una cavidad profunda. Las cavidades de estas estructuras permiten amplificar y transformar la tensión axial recibida en tensiones tangenciales y radiales sobre el piezoeléctrico. Las tapas metálicas protegen al material piezoeléctrico, permitiendo así la aplicación de mayores tensiones y consecuentemente una mayor producción de energía. Además, permiten ajustar la frecuencia de resonancia fácilmente modificando el material y las dimensiones de las tapas.

La principal diferencia entre los tres tipos de transductores es la forma de la cavidad de las tapas.

Transductor tipo Moonie

Consta de un disco de cerámica piezoeléctrica situado entre dos tapas metálicas que tienen una forma de media luna o circunferencia. Al aplicar una tensión axial, las tapas amplifican y transmiten el esfuerzo en forma de tensión radial sobre el disco piezoeléctrico.

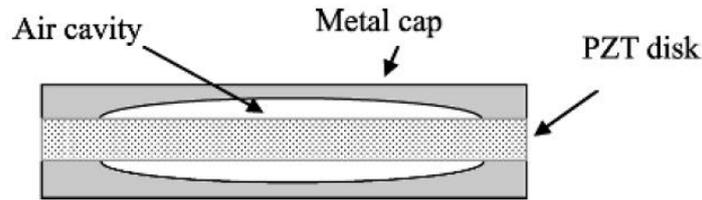


Figura 28. Transductor piezoeléctrico tipo Moonie. Obtenido de [40]

Transductor tipo Cymbal

Este tipo de transductor es muy similar al transductor tipo Moonie, la principal diferencia es que las cavidades de las tapas tienen forma cónica. El transductor tipo Cymbal se considera una mejora del transductor tipo Moonie, ya que, permite reducir la tensión aplicada en el disco PZT y a su vez genera mayores deformaciones y desplazamientos.

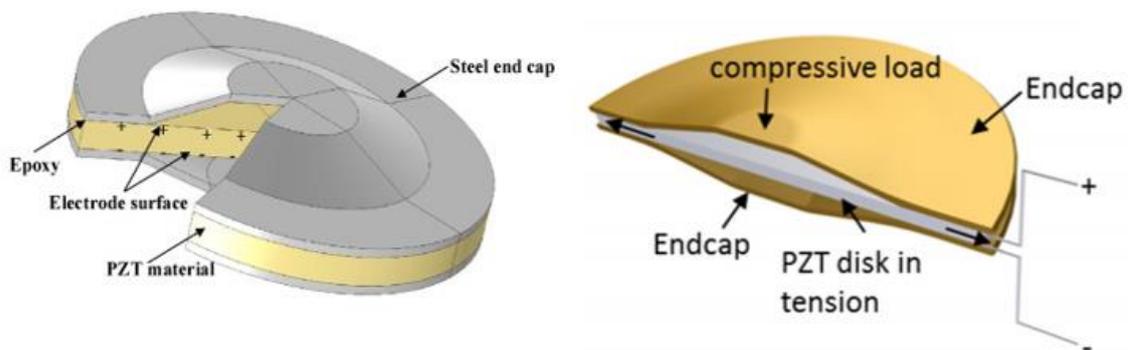


Figura 29. Transductor piezoeléctrico tipo Cymbal. Obtenido de [38][39]

Transductor tipo Bridge

Se trata de una evolución del transductor tipo Cymbal, la principal diferencia es que la estructura no es completamente circular, sino que tiene forma rectangular. Este trabajo se basa en la implantación del transductor tipo Bridge en el pavimento.

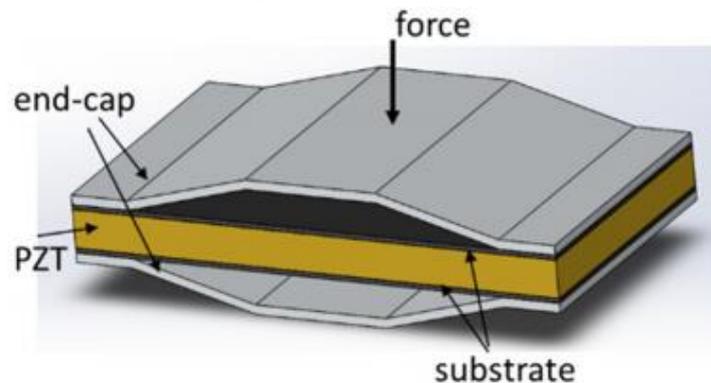


Figura 30. Transductor piezoeléctrico tipo Bridge. Obtenido de [39]

Un eficiente transductor piezoeléctrico diseñado para recolectar energía del pavimento debe de tener un alto coeficiente de acoplamiento electromecánico (k). En el artículo “*A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement*” se comparan los distintos transductores piezoeléctricos nombrados anteriormente para ser implementados en pavimento. Se demuestra que los transductores tipo Bridge tienen coeficientes de acoplamiento más elevados y que por lo tanto muestran una mayor eficiencia. Por otro lado, el transductor tipo Moonie es el que menor coeficiente de acoplamiento (k) presenta, por lo tanto, los transductores tipo Cymbal y Bridge ofrecen mejores resultados. [37]

A continuación, se muestra el gráfico obtenido al relacionar la tensión aplicada con la densidad de energía eléctrica almacenada (U_ϵ) en los tres tipos de transductores:

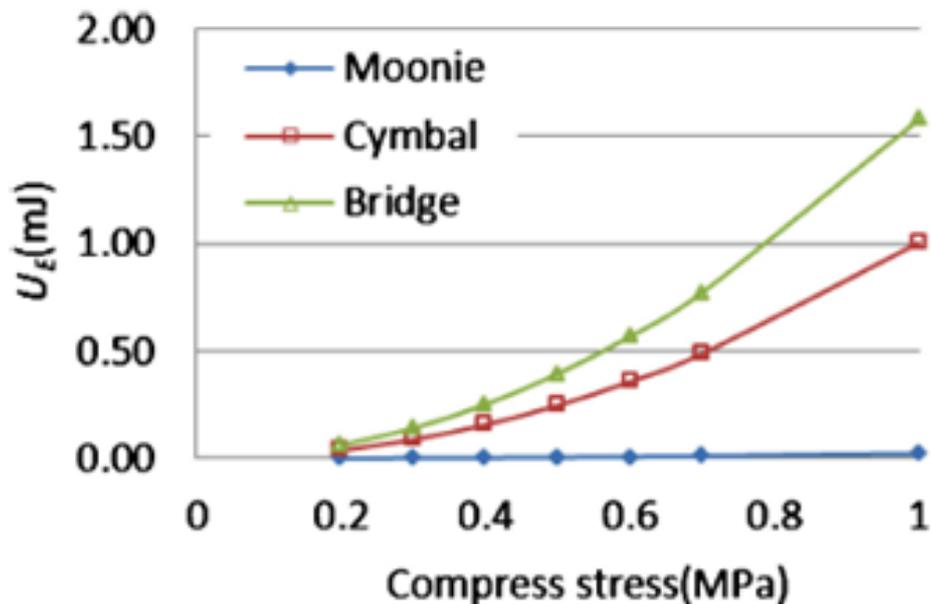


Figura 31. Relación de tensión mecánica y densidad de energía eléctrica almacenada en los transductores tipo Moonie, Cymbal y Bridge. Obtenido de [37]

3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

Tal y como se ha comentado en anteriores apartados, el principal objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento estructural de un transductor piezoeléctrico tipo Bridge para ser implementado en carretera.

Durante el desarrollo del estudio, se ha buscado llegar a un equilibrio entre la deformación del material piezoeléctrico y la resistencia de la estructura tipo Bridge que lo contiene. Se ha pretendido generar la mayor deformación posible del material piezoeléctrico, que implica también la máxima generación de energía, sin que se rompa el transductor piezoeléctrico.

Para aproximar el estudio a valores reales, se ha considerado la circulación por carretera de vehículos ligeros y pesados. Tomando un valor de carga de 0,1 MPa para los vehículos ligeros y 1 MPa para los vehículos pesados.

El estudio se divide principalmente en tres secciones:

- **Modelo para la optimización del Bridge en 2D:** Se optimiza la geometría del transductor piezoeléctrico en 2D para encontrar el diseño que ofrece los mejores resultados.
- **Modelo para la optimización de la posición del Bridge en 2D:** Una vez obtenida la geometría óptima, se implementa en el pavimento para definir la profundidad a la que se debe colocar el transductor y se estudia la influencia de la aplicación de las cargas en dos tipos de pavimentos distintos.
- **Modelo para la modelización de la salida eléctrica (3D):** Finalmente, se analiza la salida eléctrica que ofrece el sistema determinado anteriormente.

Dimensiones del piezoeléctrico

El piezoeléctrico utilizado en todos los casos estudiados es el P876 A12 de cerámica PIC255 y sus dimensiones se muestran en la siguiente imagen, es importante tenerlas presentes a la hora de diseñar la estructura del transductor piezoeléctrico.

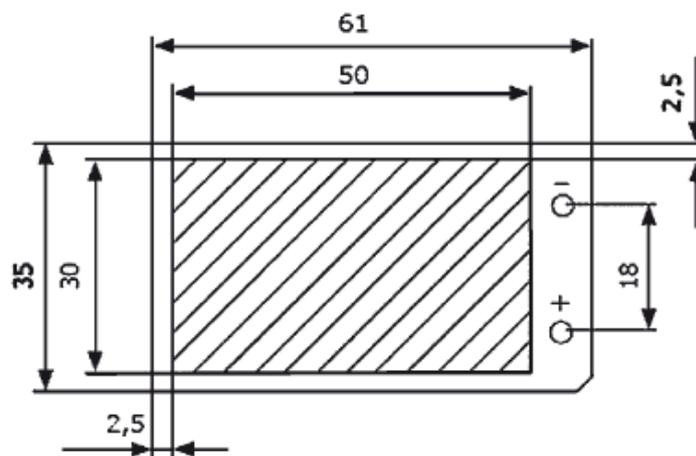


Figura 32. Medidas en mm del piezoeléctrico P876 A12. Obtenido de [41]

Resultados estudiados y comparados

A la hora de realizar el diseño, se han definido qué resultados es importante conocer para poder analizar y comparar las diferentes simulaciones realizadas a lo largo del estudio. En todos los casos se estudian los siguientes resultados:

- **Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos en dirección X [m/m]:** En ANSYS toma el nombre de *Normal elastic Strain Average – Axis X*. En el transductor se colocan dos cerámicas piezoeléctricas, una en la parte superior y otra en la parte inferior de la pletina central que tiene el diseño. La deformación estudiada será la resultante de sumar las deformaciones promedias que se producen en cada uno de los piezoeléctricos en valor absoluto.
- **Deformación vertical del piezoeléctrico [m]:** En ANSYS toma el nombre de *Directional deformation – Axis Y*. Tal y como su nombre indica, se mide el desplazamiento vertical que transmite el transductor al material piezoeléctrico.
- **Tensión promedia y máxima de la estructura [Pa]:** En ANSYS toma el nombre de *Equivalent Stress*. Indica la tensión a la que está sometida la estructura y es determinada a partir de la teoría de falla de Von Mises o criterio de la máxima energía de distorsión. En este caso, nos interesa saber su valor máximo para poder situar las zonas críticas de la estructura y estudiar si resisten o no a los esfuerzos aplicados.
- **Factor de seguridad mínimo de la estructura:** En ANSYS toma el nombre de *Safety factor*. Se estudia qué valor toma el FS en las zonas críticas. Por norma general, el factor de seguridad debe tomar un valor superior a 1 para garantizar que la estructura no rompa, por ello, a lo largo del estudio se utilizará un FS=1,5.

A lo largo de este apartado se explica la metodología utilizada y los resultados obtenidos en cada una de las tres situaciones estudiadas.

3.1 Modelo para la optimización del bridge en 2D

Mediante la realización de diversas simulaciones numéricas en ANSYS se han determinado las dimensiones y materiales que debe tener el transductor piezoeléctrico para ofrecer los mejores resultados. Durante esta parte del estudio y con el objetivo de simplificar el proceso, las simulaciones se han realizado en 2D y con la mitad del modelo, ya que, la geometría tipo Bridge permite realizar un estudio por simetría.

3.1.1 Geometría/variables a optimizar

En primer lugar, se define la geometría que va a tener el transductor tipo Bridge y las distintas variables que se van a estudiar.

En la figura 32 se observa que a diferencia de un transductor tipo Bridge común (figura 39), se ha añadido una barra vertical que favorece la deformación de la chapa central en la que va situada el material piezoeléctrico.

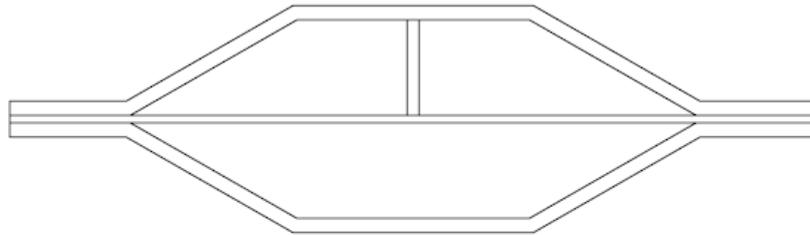


Figura 33. Geometría del transductor tipo Bridge estudiado. Fuente propia

Como ya se ha comentado, esta parte del estudio se ha realizado por simetría. En la figura 33, se muestran las variables que se han considerado importantes a la hora de definir el diseño del transductor.

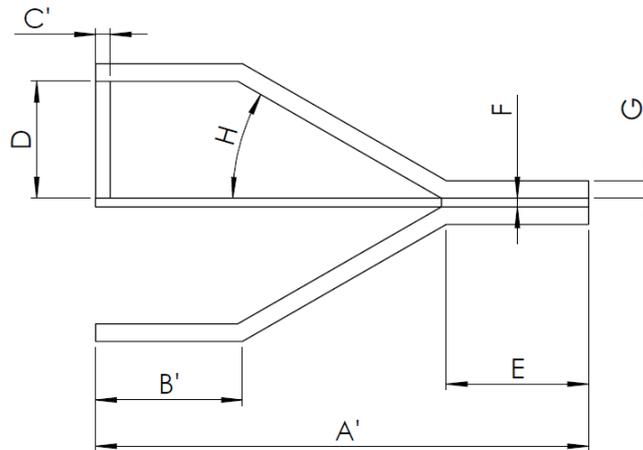


Figura 34. Croquis en que se indican las variables definidas para realizar el estudio por simetría. Fuente propia.

De todos los parámetros indicados en la figura anterior (figura 34), la variación de la dimensión A' no se estudia directamente, ya que es un parámetro dependiente y varía en función de los demás. Por lo tanto, los parámetros sobre los que se realiza el estudio son: B' , C' , D , E , F y G .

A continuació, se indiquen els valors que se han estudiat per a cada un dels paràmetres:

Tabla 1. Valores estudiados por cada uno de los parámetros independientes

Valores estudiados por cada uno de los parámetros						
B' (mm)	C' (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	H (º)
10	2	5	10	0,5	0,5	5
12,5	2,5	10	15	1	1	10
15	3	15	20	1,5	1,5	15
17,5	3,5	20	25	2	2	20
20	4	25	30	2,5	2,5	25
22,5	4,5	30	35	3	3	30
25	5		40			35
27,5			45			40
30			50			45
			55			50
			60			55
						60

Los valores sombreados en la Tabla 1 indican las dimensiones que se han utilizado en la geometría inicial para empezar a realizar las diversas simulaciones numéricas.

El procedimiento general realizado ha sido el siguiente:

- 1- Se modifican los parámetros de forma independiente para observar qué influencia tiene la variación de cada uno de ellos en los resultados finales. Se empieza variando uno de los parámetros.
- 2- Una vez analizados los efectos de la variación del parámetro, se escoge un valor definitivo para éste y se prosigue a realizar las siguientes simulaciones variando otro de los parámetros. Es un método sistemático que se ha realizado hasta obtener un diseño que aporte los resultados deseados. Finalmente, se han reajustado algunos de los parámetros para acabar de optimizar el diseño.

Los valores seleccionados y el criterio utilizado para ello se explican en profundidad en el apartado "3.1.4 Resultados".

3.1.2 Condiciones de contorno, contactos y cargas

En esta parte del trabajo y como ya se ha comentado anteriormente, se realiza un estudio por simetría en 2D del transductor piezoeléctrico sin ser implementado en el pavimento.

Esto permite simplificar el problema al máximo para centrarse primeramente en el diseño dimensional de la estructura.

De manera predeterminada, ANSYS aplica el contacto *bonded* a todos los sólidos que forman el modelo, a lo largo del estudio dejaremos este tipo de contacto aplicado. Cuando las regiones de una estructura están unidas por un contacto *bonded*, no se permite que haya desplazamientos, separaciones ni penetraciones entre superficies o bordes. En otras palabras, se trata al conjunto como si fuese un solo sólido y todas las piezas estuviesen soldadas entre ellas. La principal ventaja es que permite simplificar el estudio y obtener soluciones lineales, ya que, el área de contacto entre regiones no variará.

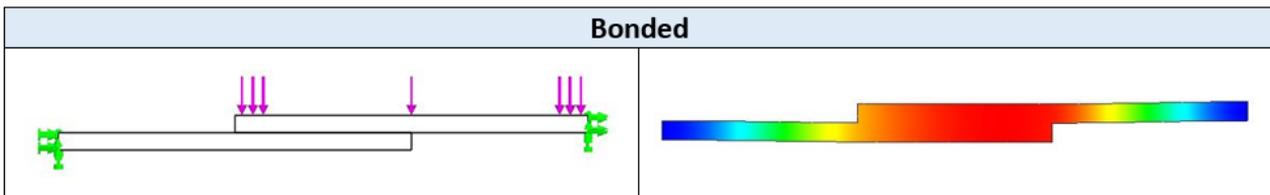


Figura 35. Simulación de un contacto *bonded* en SolidWorks. Obtenido de [42]

Se aplica una presión vertical en sentido negativo a lo largo de la superficie superior de la estructura. Esta presión simula la tensión que provoca el pavimento sobre la estructura debido a la circulación de vehículos por la carretera. En este caso, la carga tiene un valor de $1E+006$ Pa y simula el paso de vehículos pesados. La única diferencia respecto a los vehículos ligeros, es que, para éstos la presión aplicada tiene un valor de $1E+005$ Pa.

Por otro lado, se aplica un soporte en la superficie inferior de la estructura que impide el desplazamiento horizontal ($X=0$) y vertical ($Y=0$). Se pone este tipo de soporte para ajustar al máximo las simulaciones a procesos experimentales que se pueden realizar.

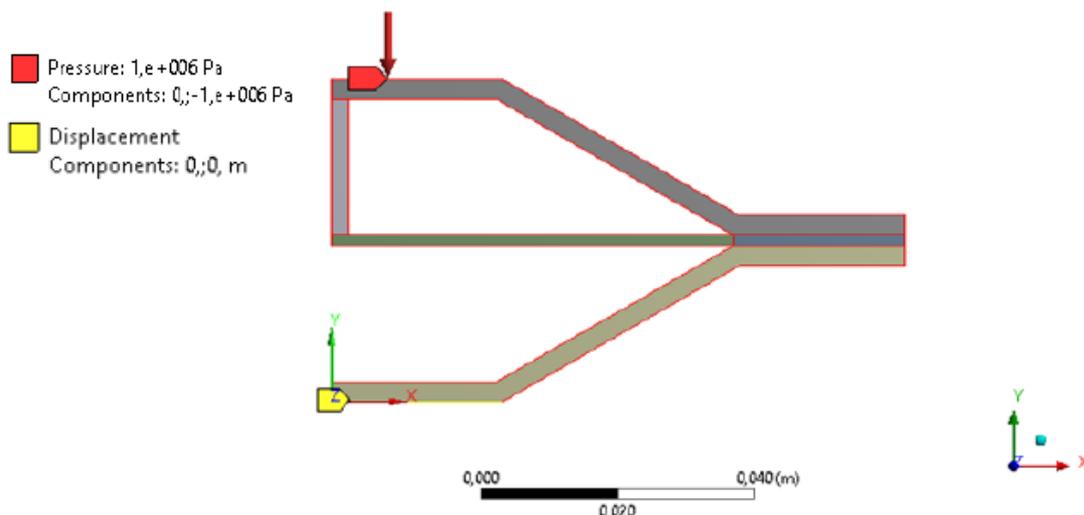


Figura 36. Contactos y cargas aplicadas en el modelo para la optimización del Bridge en 2D para vehículos pesados. Fuente propia

3.1.3 Mallado

Se han realizado diversas simulaciones numéricas ajustando los distintos parámetros hasta encontrar el diseño óptimo. Posteriormente y sobre ésta misma geometría seleccionada, se han modificado diversos parámetros del mallado para aproximar mejor los resultados a la realidad. A la malla se le ha implicado la condición de que tenga los nodos coincidentes, hecho que indirectamente equivale a aplicar una condición de contacto *bonded* entre las distintas regiones que forman la estructura. Pese a haber aplicado anteriormente una condición de contacto *bonded*, también se aplica este efecto en la malla para cerciorarse de que realmente el conjunto se está tratando como un solo sólido y no hay desplazamientos ni separaciones entre regiones, y, a su vez, se simplifica el proceso de cálculo.

Por otro lado, se refina la malla para obtener valores más reales. Para definir la malla se aumenta el número de nodos que la forman, hecho que implica también una reducción dimensional en cada una de sus particiones.

En la Tabla 2, se observa que generalmente, a medida que se aumenta el número de nodos y se refina el mallado, la deformación del material piezoeléctrico aumenta ligeramente ajustándose a valores más exactos. Se considera que el refinamiento del mallado ésta optimizado al máximo en el momento en que los resultados obtenidos difieren menos de un 5% respecto los valores anteriores.

Tabla 2. Resultados obtenidos según la variación de nodos de la malla para vehículos pesados. Fuente propia.

Nodos de la malla	Deformación promedia en la superficie del piezoeléctrico (Superior e inferior) [m/m]	Deformación vertical [m]	Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]	Factor de seguridad de la estructura
935	1,441E-03	-2,616E-04	1,572E+08	1,49
1098	1,442E-03	-2,630E-04	1,534E+08	1,53
1371	1,438E-03	-2,628E-04	1,562E+08	1,50
1644	1,443E-03	-2,627E-04	1,568E+08	1,50
2893	1,449E-03	-2,661E-04	1,834E+08	1,28
4548	1,458E-03	-2,634E-04	1,900E+08	1,24

Una vez obtenida la geometría final, se refina la malla. A partir de los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que el mallado más óptimo és el que tiene 1644 nodos, ya que si se sigue refinando la malla se observan diferencias en los resultados superiores al 5% respecto a los anteriores, sobre todo en la “Tensión equivalente máxima de la estructura” debido a los concentradores presentes. Los resultados obtenidos para vehículos ligeros son análogos a los mostrados anteriormente.

3.1.4 Resultados

Materiales utilizados para el transductor piezoeléctrico

A parte de las dimensiones de la estructura, es importante decidir de qué materiales va a estar hecha cada una de las piezas que la forman.

En primer lugar, se ha decidido que los principales elementos estructurales del transductor, es decir, la tapa superior e inferior estén hechas de acero. El acero tiene un límite elástico superior a otros metales, hecho que permite que el transductor esté sometido a mayores tensiones sin que se rompa y por lo tanto permite una mayor generación de energía.

Por otro lado, es importante que la barra vertical que hay en el medio del transductor sea de un material rígido, de forma que transmita el máximo movimiento y genere la máxima deformación posible sobre el piezoeléctrico, por ello también estará hecha de acero.

La chapa central, sobre la que va situada el material piezoeléctrico, no se considera uno de los principales elementos estructurales del transductor. Sin embargo, debe cumplir otras características importantes, debe ser flexible para poder flectar y que consecuentemente también flexione el material piezoeléctrico que va colocado a ella. Por ello, se ha decidido que estará formada por aluminio, ya que es un material más flexible y dúctil que otros y soporta mejor las deformaciones, ya que las absorbe elásticamente. El hecho de que el aluminio tenga un límite elástico menor que el acero no supone ningún problema en este caso, ya que, las tensiones a las que está sometida la chapa son mucho menores a las que se aplican directamente sobre la estructura y, por lo tanto, no rompe.

Después de informarse sobre los típicos aceros y aluminios utilizados en la industria y sus usos y propiedades. Se ha decidido que el acero que forma la estructura y la barra vertical sea el acero S235JR y que el aluminio que forma la chapa central sea el 1050.

Tabla 3. Propiedades principales de los materiales del transductor. Fuente propia.

PROPIEDADES	Aluminio 1050	ACERO S235 JR
Densidad [Kg/m ³]	2700	7850
Modulo de Young [Pa]	6,90E+10	2,35E+08
Coefficiente de Poisson	0,33	0,28

El acero S235JR sigue la norma de los "Aceros estructurales no aleados" (EN-10025-2), por lo tanto, se trata de un acero no aleado que suele presentarse en forma de chapa o perfil laminado en caliente para construcciones soldadas, remachadas o atornilladas, y, suele utilizarse a temperatura ambiente. Concretamente, el acero S235JR es un acero de bajo coste que suele ser uno de los más utilizados cuando se habla de estructuras ligeras y piezas mecánicas que requieren poca responsabilidad. Además, permite cualquier tipo de soldadura y sus letras (JR) nos indican que asegura un valor mínimo de flexión a 20º C. Se llega a la conclusión de que cumple todos los requisitos que precisa el transductor piezoeléctrico. [43]

Por otro lado, el aluminio 1050 pertenece a la norma de “Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas” (UNE-EN 485-2). Se trata de un aluminio muy utilizado en el mundo de la industria, especialmente en formas laminadas, y permite realizar una buena soldadura, hecho que nos conviene para soldar la chapa central con la barra vertical de acero que tiene el transductor en su parte central.

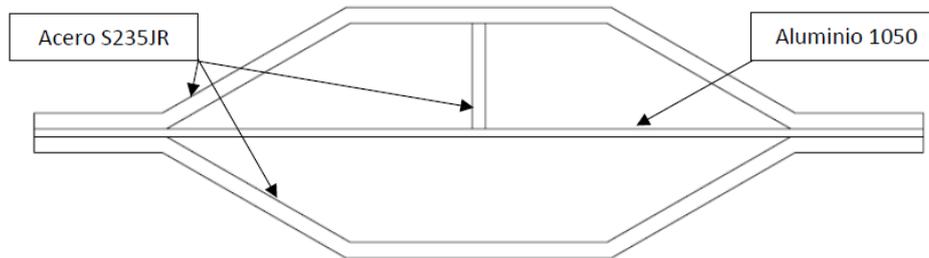


Figura 37. Materiales utilizados en cada pieza del transductor. Fuente propia.

Tensión equivalente máxima generada

A partir de los conocimientos adquiridos y las simulaciones realizadas previamente, se llega a la conclusión de que la zona crítica siempre se encuentra en la parte central del transductor y no en sus extremos, ya que, es la zona que más flexa y por lo tanto está sometida a más esfuerzos.

A: Static Structural

Equivalent Stress ESTRUCTURA
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
09/06/2020 19:08

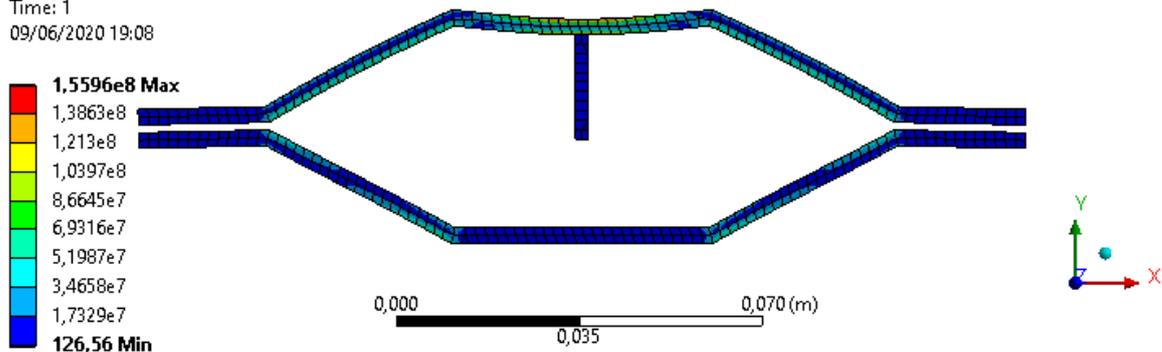


Figura 38. Simulación de la tensión equivalente en la estructura final para vehículos pesados. Fuente propia.

Selección de los parámetros

Se ha garantizado que el transductor no se rompe con el paso de vehículos pesados y a su vez sigue deformándose y generando diferencia de potencial con el paso de vehículos ligeros. Para ello, se ha definido que la estructura tenga un factor de seguridad de 1,5, que aparte de asegurar que la estructura no se rompe, permite comparar los resultados con el TFG realizado paralelamente por otro alumno.

El hecho de que la geometría actúe con un valor de $FS=1,5$, nos permite asegurar que posteriormente durante su instalación en el pavimento, resistirá el peso del aglomerado y sobre todo su posterior compactación.

Para definir cada uno de los parámetros, primeramente, se ha priorizado la deformación que se genera en la superficie de los piezoeléctricos y más adelante se ha ido ajustando el factor de seguridad gracias a redefinir algunos parámetros.

- **Variación del parámetro C'**

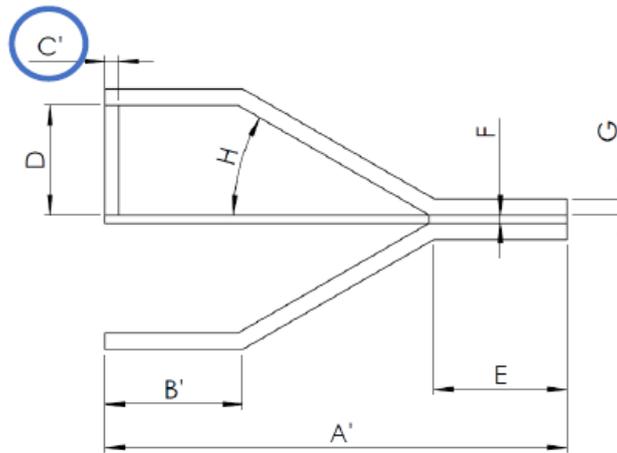


Figura 39. Croquis parámetro C' . Fuente propia.

Tabla 4. Resultados obtenidos de la variación del parámetro C' y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro C' [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedio de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
2,00	1,10E-04	1,10E-03	-2,66E-05	-2,66E-04	2,94E+06	2,94E+07	2,17E+07	2,17E+08	10,85	1,09
2,50	1,11E-04	1,11E-03	-2,60E-05	-2,60E-04	2,86E+06	2,86E+07	2,21E+07	2,21E+08	10,65	1,07
3,00	1,10E-04	1,10E-03	-2,54E-05	-2,54E-04	2,86E+06	2,86E+07	2,17E+07	2,17E+08	10,81	1,08
3,50	1,10E-04	1,10E-03	-2,47E-05	-2,47E-04	2,79E+06	2,79E+07	2,21E+07	2,21E+08	10,62	1,06
4,00	1,09E-04	1,09E-03	-2,40E-05	-2,40E-04	2,75E+06	2,75E+07	2,23E+07	2,23E+08	10,54	1,05
4,50	1,08E-04	1,08E-03	-2,34E-05	-2,34E-04	2,76E+06	2,76E+07	2,17E+07	2,17E+08	10,81	1,08
5,00	1,07E-04	1,07E-03	-2,28E-05	-2,28E-04	2,67E+06	2,67E+07	2,23E+07	2,23E+08	10,54	1,05

Durante el estudio de la variación del parámetro C' (grosor de la barra vertical), se observa que, al aumentar el grosor, disminuye tanto la deformación vertical producida como la deformación total generada en la superficie de los piezoeléctricos. Por otro lado, y como es de esperar, se observa que, al disminuir las deformaciones producidas, la tensión equivalente promedio a la que está sometida la estructura del transductor también disminuye.

Esto es debido a que contra menor es el grosor de la barra central, los momentos a los que se encuentra sometida la pieza son mayores. Es un comportamiento análogo al de una viga biapoyada a la que se le aplican dos cargas separadas (Figura 38), al aumentar la distancia a la que se aplica la carga, aumenta el momento máximo generado.

Paralelamente, se observa que el factor de seguridad, que va relacionado con la tensión equivalente máxima, disminuye ligeramente.

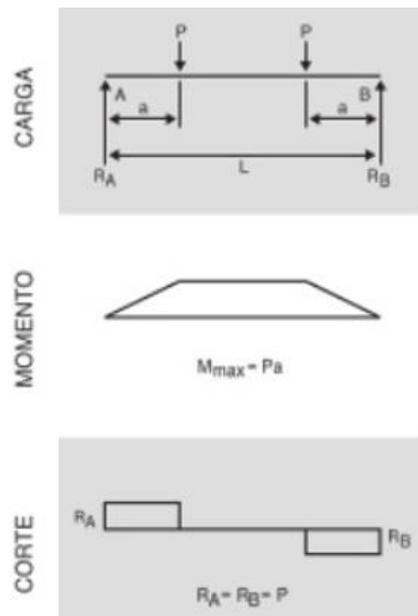


Figura 40. Diagrama cortante y diagrama de momentos de una viga biapoyada con dos fuerzas aplicadas. Obtenido de [44]

Valor seleccionado: Se escoge un valor de 2,5 mm, ya que en la tabla se puede observar que es la dimensión que mayor deformación promedio genera en la superficie de los piezoeléctricos.

- **Variación del parámetro D**

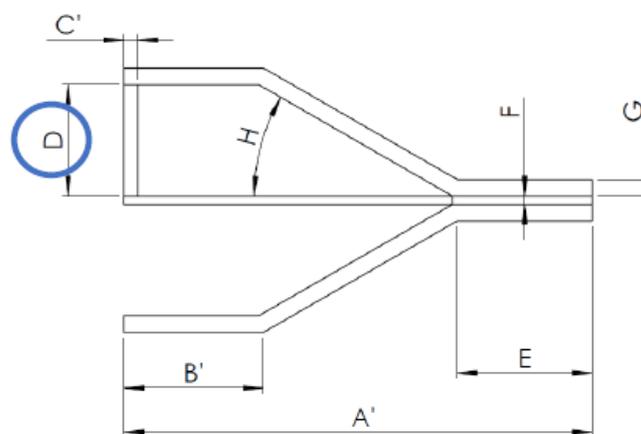


Figura 41. Croquis parámetro D. Fuente propia.

Tabla 5. Resultados obtenidos de la variación del parámetro D y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro D [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedio de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
5,00	6,34E-05	6,35E-04	-1,51E-05	-1,51E-04	2,88E+06	2,89E+07	1,88E+07	1,88E+08	12,51	1,25
10,00	1,02E-04	1,02E-03	-2,15E-05	-2,15E-04	2,89E+06	2,89E+07	1,97E+07	1,97E+08	11,95	1,19
15,00	1,11E-04	1,11E-03	-2,60E-05	-2,60E-04	2,86E+06	2,86E+07	2,21E+07	2,21E+08	10,65	1,07
20,00	1,13E-04	1,13E-03	-2,97E-05	-2,97E-04	2,88E+06	2,88E+07	2,37E+07	2,37E+08	9,91	0,99
25,00	1,14E-04	1,14E-03	-3,31E-05	-3,31E-04	2,92E+06	2,92E+07	2,47E+07	2,47E+08	9,51	0,95
30,00	1,12E-04	1,12E-03	-3,61E-05	-3,61E-04	3,20E+06	3,20E+07	2,55E+07	2,55E+08	9,21	0,92

Durante la realización del estudio de este parámetro, se ha observado que para una dimensión D (altura de la barra vertical) de 5 mm y con las medidas de las que se ha partido, la superficie de la pletina en la que se instalan las cerámicas piezoeléctricas tendría una longitud de 62 mm, valor que se considera muy pequeño y puede dificultar la instalación del elemento piezoeléctrico, que ocupa una longitud de 61mm (según se observa en la figura 30).

A partir de los resultados obtenidos, se puede observar que la deformación en la superficie de los piezoeléctricos, la deformación vertical y el estrés equivalente aumentan a medida que la altura de la barra vertical lo hace. Por lo tanto, se puede deducir que contra más altura tiene la barra, mayores momentos se generan. Esto es debido a la mayor flexibilidad que ofrecen las tapas de mayor altura.

Valor seleccionado: Se escoge un valor de 20 mm de altura, ya que es uno de los valores que más deformaciones genera. No se quiere extremar más este valor ya que la tensión equivalente promedio también aumenta notablemente y se busca reducirla con el objetivo de conseguir que la estructura tenga un factor de seguridad próximo a 1,5 durante el paso de vehículos pesados.

- **Variación del parámetro B'**

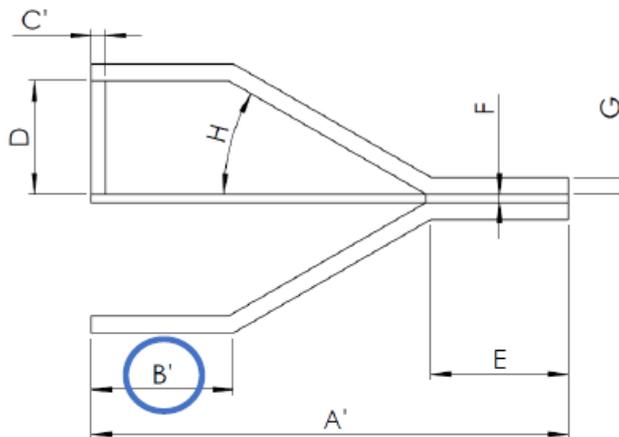


Figura 42. Croquis parámetro B'. Fuente propia.

Tabla 6. Resultados obtenidos de la variación del parámetro B' y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro B' [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedio de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
10,00	4,76E-05	4,76E-04	-5,30E-06	-5,30E-05	7,72E+05	7,72E+06	6,07E+06	6,07E+07	38,71	3,87
12,50	6,02E-05	6,02E-04	-7,86E-06	-7,86E-05	1,05E+06	1,05E+07	8,96E+06	8,96E+07	26,21	2,62
15,00	7,30E-05	7,30E-04	-1,13E-05	-1,13E-04	1,42E+06	1,42E+07	1,22E+07	1,22E+08	19,25	1,93
17,50	8,62E-05	8,62E-04	-1,59E-05	-1,59E-04	1,84E+06	1,84E+07	1,57E+07	1,57E+08	14,92	1,49
20,00	9,96E-05	9,96E-04	-2,19E-05	-2,19E-04	2,33E+06	2,33E+07	1,96E+07	1,96E+08	11,97	1,20
22,50	1,13E-04	1,13E-03	-2,97E-05	-2,97E-04	2,88E+06	2,88E+07	2,37E+07	2,37E+08	9,91	0,99
25,00	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,51E+06	3,51E+07	2,80E+07	2,80E+08	8,40	0,84
27,50	1,42E-04	1,42E-03	-5,18E-05	-5,18E-04	4,17E+06	4,17E+07	3,26E+07	3,26E+08	7,20	0,72
30,00	1,56E-04	1,56E-03	-6,68E-05	-6,68E-04	4,89E+06	4,89E+07	3,73E+07	3,73E+08	6,30	0,63

En la tabla de valores obtenidos se puede observar que conforme el valor B' aumenta, es decir, contra más larga es la parte superior del transductor, mayores es la deformación vertical y la deformación que se genera en la superficie de los piezoeléctrico. En consecuencia, las tensiones equivalentes aumentan de forma más exponencial y el factor de seguridad disminuye.

Al aumentar la longitud de la parte central del transductor, se amplía consecuentemente la superficie expuesta a los esfuerzos aplicados, y, por lo tanto, se genera una mayor tensión.

Valor seleccionado: Se ha observado que el factor de seguridad disminuye de forma prácticamente exponencial y las deformaciones aumentan de una forma más lineal. Se decide escoger un valor de 25 mm, es uno de los que más deformaciones produce, pero a la vez reduce menos el factor de seguridad, de forma que podrá ser compensado posteriormente con el ajuste de otro parámetro.

- **Variación del parámetro E**

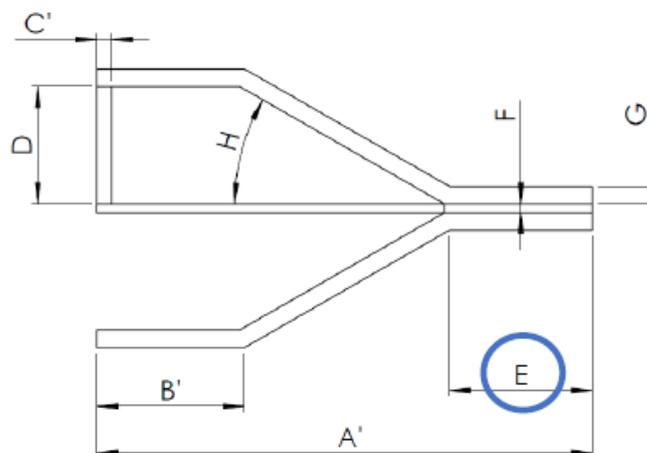


Figura 43. Croquis parámetro E. Fuente propia.

Tabla 7. Resultados obtenidos de la variación del parámetro E y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro E [mm]	Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
10	1,27E-04	1,27E-03	-3,96E-05	-3,96E-04	3,97E+06	3,97E+07	2,80E+07	2,80E+08	8,39	0,84
15	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,73E+06	3,73E+07	2,81E+07	2,81E+08	8,37	0,84
20	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,51E+06	3,51E+07	2,80E+07	2,80E+08	8,40	0,84
25	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,31E+06	3,31E+07	2,80E+07	2,80E+08	8,39	0,84
30	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,13E+06	3,13E+07	2,78E+07	2,78E+08	8,44	0,84
35	1,26E-04	1,26E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,51E+06	3,51E+07	2,77E+07	2,77E+08	8,49	0,85
40	1,26E-04	1,26E-03	-3,94E-05	-3,94E-04	3,26E+06	3,26E+07	2,94E+07	2,94E+08	7,98	0,80
45	1,25E-04	1,25E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,14E+06	3,14E+07	2,95E+07	2,95E+08	7,98	0,80
50	1,26E-04	1,26E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,26E+06	3,26E+07	2,77E+07	2,77E+08	8,48	0,85
55	1,26E-04	1,26E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	2,97E+06	2,97E+07	2,81E+07	2,81E+08	8,37	0,84
60	1,25E-04	1,25E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	2,96E+06	2,96E+07	2,81E+07	2,81E+08	8,37	0,84

En la tabla 7 se observa que tanto la deformación promedia generada en la superficie de los piezoeléctricos como la deformación vertical, tienen una variación prácticamente nula, por lo tanto, no se consideran significativos. En cambio, la tensión equivalente promedia y máxima y en consecuencia el factor de seguridad, si presentan mayores variaciones. Por lo tanto, la dimensión E puede ser útil para ajustar mejor el factor de seguridad que se busca.

En este caso, los valores obtenidos no son tan predictivos como los obtenidos en los demás parámetros. Por ello se han adjuntado la figura 42 y la figura 43, gracias a ellas podemos decidir qué valor debe tener el parámetro E.

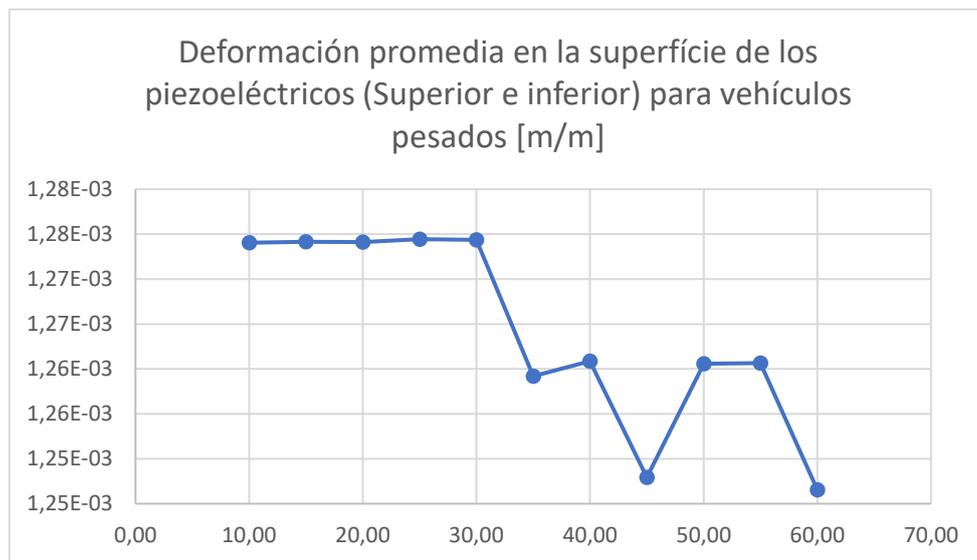


Figura 44. Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos para vehículos pesados. Fuente propia

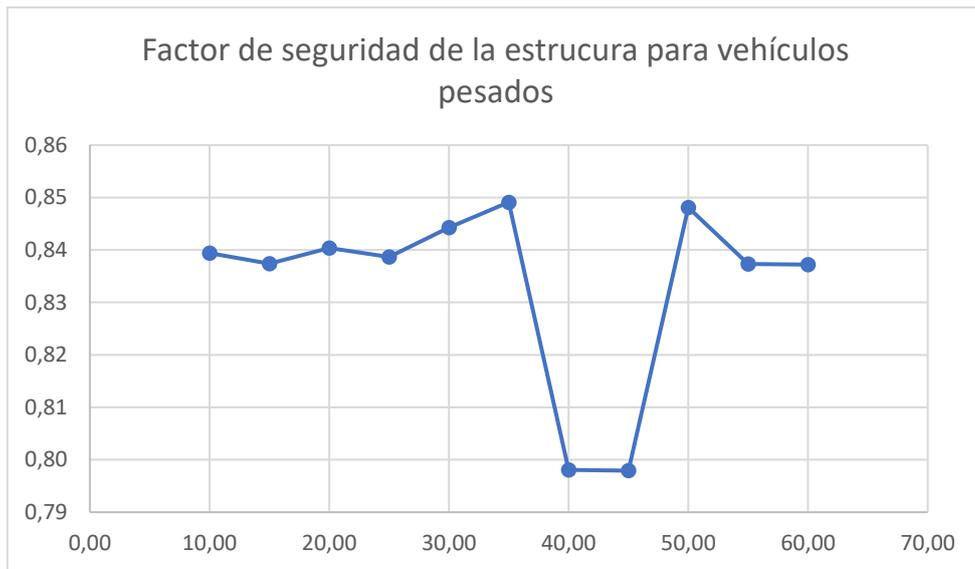


Figura 45. Factor de seguridad de la estructura para vehículos pesados. Fuente propia.

Valor seleccionado: Se escoge un valor de 30 mm, ya que pese a que no hay mucha variación en la deformación que se genera en las cerámicas piezoeléctricas, es el valor que más deformación genera. Por otro lado, genera uno de los factores de seguridad y deformación vertical más elevadas.

Se observa que al aumentar las dimensiones del parámetro E (partes laterales del transductor), la tensión equivalente promedio disminuye. De todas formas, el valor seleccionado se ajusta al máximo, ya que coger una dimensión más grande para reducir la tensión equivalente promedio supondría una necesidad de más material y por lo tanto una mayor inversión y coste. Además, a partir de la tensión equivalente máxima ya se asegura que la estructura resiste la aplicación de los esfuerzos.

- **Variación del parámetro G**

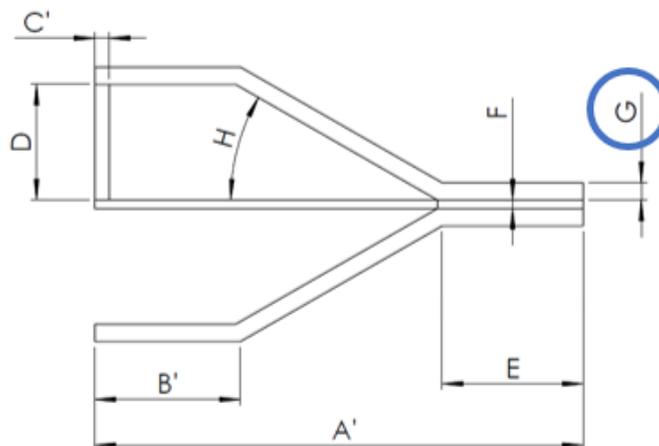


Figura 46. Croquis parámetro G. Fuente propia.

Tabla 8. Resultados obtenidos de la variación del parámetro G y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro G [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedio de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
0,50	4,62E-04	4,62E-03	-6,84E-04	-6,84E-03	3,47E+07	3,47E+08	2,16E+08	2,16E+09	1,09	0,11
1,00	1,27E-04	1,27E-03	-1,49E-04	-1,49E-03	1,11E+07	1,11E+08	8,10E+07	8,10E+08	2,90	0,29
1,50	1,30E-04	1,30E-03	-6,53E-05	-6,53E-04	5,62E+06	5,62E+07	4,39E+07	4,39E+08	5,35	0,54
2,00	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,13E+06	3,13E+07	2,78E+07	2,78E+08	8,44	0,84
2,50	1,20E-04	1,20E-03	-2,84E-05	-2,84E-04	2,35E+06	2,35E+07	1,95E+07	1,95E+08	12,03	1,20
3,00	1,13E-04	1,13E-03	-2,24E-05	-2,24E-04	1,99E+06	1,99E+07	1,47E+07	1,47E+08	15,95	1,60

Al reducir el espesor de la chapa, el material opone menos resistencia a los esfuerzos aplicados, y, por lo tanto, la estructura permite una mayor flexión, que consecuentemente será transmitida al material piezoeléctrico a partir de la barra vertical y la pletina central de aluminio que tiene el transductor piezoeléctrico.

En la tabla, se observa que, a menor grosor de la chapa de la estructura, mayores deformaciones se generar y, por lo tanto, también se reduce el factor de seguridad. Además, al pasar de un grosor de 0,5 mm a 1 mm, se observa una gran diferencia de los resultados obtenidos, ya que un grosor de 0,5 mm es muy poco resistente a los esfuerzos que se le están aplicando.

Valor seleccionado: Se selecciona un valor de 2mm de grosor.

- **Variación del parámetro H**

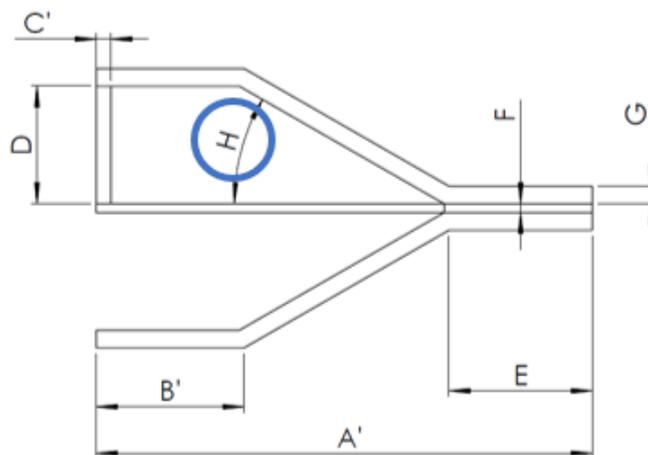
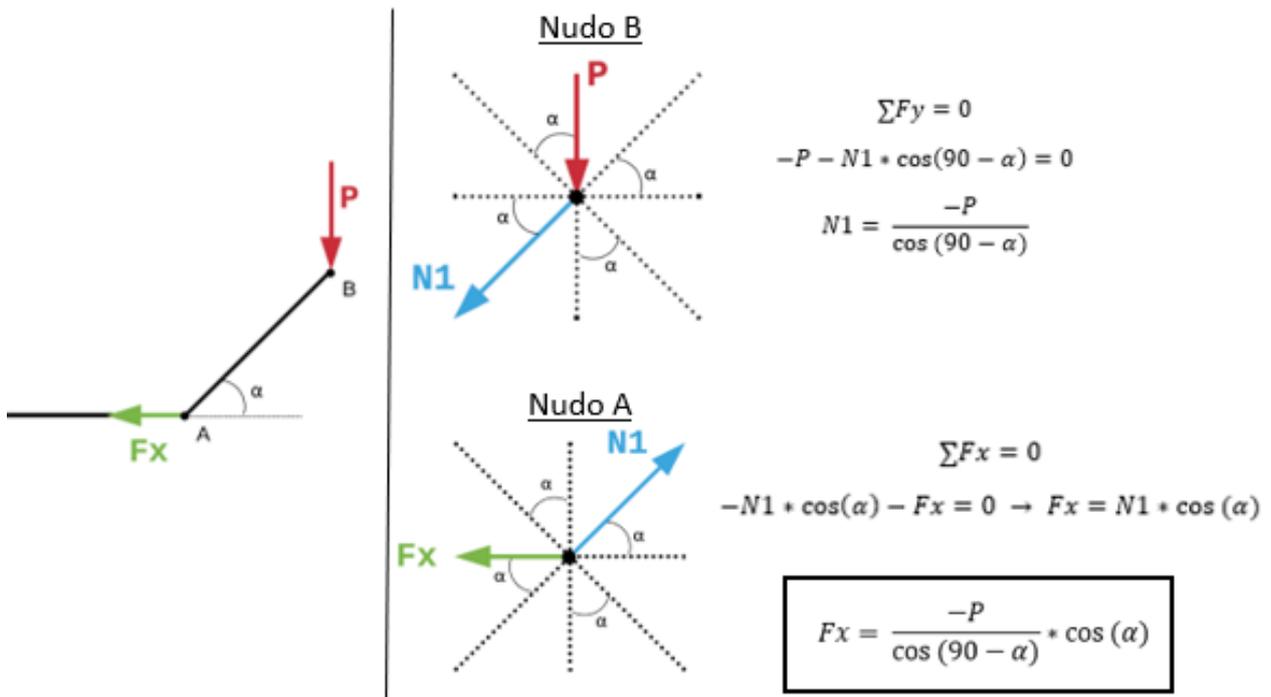


Figura 47. Croquis del parámetro H. Fuente propia.

Tabla 9. Resultados obtenidos de la variación del parámetro H y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro H [mm]	Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
5,00	7,23E-04	7,23E-03	-2,54E-03	-2,54E-02	1,41E+07	1,41E+08	7,18E+07	7,18E+08	3,27	0,33
10,00	3,73E-04	3,73E-03	-3,85E-04	-3,85E-03	6,95E+06	6,95E+07	5,02E+07	5,02E+08	4,68	0,47
15,00	2,55E-04	2,55E-03	-1,47E-04	-1,47E-03	5,21E+06	5,21E+07	3,97E+07	3,97E+08	5,92	0,59
20,00	1,91E-04	1,91E-03	-8,00E-05	-8,00E-04	4,53E+06	4,53E+07	3,40E+07	3,40E+08	6,92	0,69
25,00	1,53E-04	1,53E-03	-5,29E-05	-5,29E-04	3,99E+06	3,99E+07	3,17E+07	3,17E+08	7,40	0,74
30,00	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,13E+06	3,13E+07	2,78E+07	2,78E+08	8,45	0,84
35,00	1,08E-04	1,08E-03	-3,17E-05	-3,17E-04	2,93E+06	2,93E+07	2,59E+07	2,59E+08	9,07	0,91
40,00	9,22E-05	9,22E-04	-2,66E-05	-2,66E-04	2,76E+06	2,76E+07	2,53E+07	2,53E+08	9,30	0,93
45,00	7,98E-05	7,98E-04	-2,31E-05	-2,31E-04	2,61E+06	2,60E+07	2,27E+07	2,27E+08	10,36	1,04
50,00	6,93E-05	6,93E-04	-2,05E-05	-2,05E-04	2,49E+06	2,49E+07	2,65E+07	2,65E+08	8,86	0,89
55,00	6,02E-05	6,02E-04	-1,84E-05	-1,84E-04	2,39E+06	2,39E+07	2,68E+07	2,68E+08	8,76	0,88
60,00	5,21E-05	5,21E-04	-1,67E-05	-1,67E-04	2,27E+06	2,27E+07	2,01E+07	2,01E+08	11,72	1,17

Conforme el ángulo de la estructura aumenta, se reducen las tensiones equivalentes y las deformaciones ya que el esfuerzo horizontal que se transmite a la parte lateral del transductor es menor. A continuación, se realiza la demostración:



Valor seleccionado: Se escoge un valor final de un ángulo de 30° para mantener el factor de seguridad con valores más o menos próximos a 1 y no reducir las deformaciones generadas, ya que éstas disminuyen de una exponencial mientras que el factor de seguridad aumenta de una forma lineal. Por lo tanto, no interesa aumentar el factor de seguridad a través de este parámetro, ya que provoca una gran disminución de las deformaciones.

- **Variación del parámetro F**

Tabla 10. Resultados obtenidos de la variación del parámetro F y valor seleccionado. Fuente propia.

Parámetro F [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
0,50	4,39E-04	4,39E-03	-7,93E-05	-7,93E-04	4,45E+06	4,45E+07	3,50E+07	3,50E+08	6,71	0,67
1,00	2,43E-04	2,43E-03	-5,54E-05	-5,54E-04	3,58E+06	3,58E+07	3,19E+07	3,19E+08	7,36	0,74
1,50	1,67E-04	1,67E-03	-4,56E-05	-4,56E-04	3,31E+06	3,31E+07	2,99E+07	2,99E+08	7,87	0,79
2,00	1,27E-04	1,27E-03	-3,95E-05	-3,95E-04	3,13E+06	3,13E+07	2,78E+07	2,78E+08	8,44	0,84
2,50	1,00E-04	1,00E-03	-3,50E-05	-3,50E-04	3,55E+06	3,55E+07	2,56E+07	2,56E+08	9,18	0,92
3,00	8,25E-05	8,25E-04	-3,14E-05	-3,14E-04	3,35E+06	3,35E+07	2,33E+07	2,33E+08	10,07	1,01

La variación del parámetro F (grosor de la pletina de aluminio) tiene un comportamiento análogo a la variación del parámetro G (grosor de la estructura). Es decir, a medida que se aumenta el grosor, se generan menores deformaciones y tensiones equivalentes y, por lo tanto, el factor de seguridad disminuye. Esto es debido, a que un mayor grosor de la pletina permite que se produzcan menos esfuerzos de flexión y por lo tanto las deformaciones se reducen.

Valor seleccionado: Se escoge un valor de 2mm de grosor, se evita escoger un grosor más pequeño con el objetivo de mantener el factor de seguridad más próximo a 1. Además, es la dimensión que menor tensión equivalente promedia produce. No se estudian mayores grosores, ya que la pletina central debe tener un grosor pequeño para permitir que flexe y se produzcan las deformaciones que se buscan en la cerámica piezoeléctrica que va situada sobre ella.

- **Reajuste de los parámetros E, F y G**

Como se puede observar, en las selecciones anteriores se ha priorizado la selección de los parámetros en función de las deformaciones que estos causan en los resultados finales. En cambio, la tensión equivalente máxima y el factor de seguridad que se producen no se han tenido tan presentes mientras se seleccionaban los valores, por ello se ha obtenido un factor de seguridad final de 8,44 para vehículos ligeros y 0,84 para vehículos pesados.

Para conseguir el objetivo de que la estructura no se rompa y actúe con un factor de seguridad cercano a 1,5, se han reajustado algunos de los parámetros definidos anteriormente.

Las medidas obtenidas previamente al reajuste de los parámetros son las siguientes:

Tabla 11. Dimensiones previas al reajuste de los parámetros E, F y G. Fuente propia.

	A [mm]	B' [mm]	C' [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	H [°]
Dimensiones previas al reajuste de los parámetros E, F y G	167,7	25	2,5	20	30	2	2	30

Anteriormente, se han estudiado los resultados que se obtienen a partir de la variación de cada uno de los parámetros. Observando estos mismos resultados se puede prever qué tendencia sigue el factor de seguridad para cada uno de los parámetros modificados y finalmente, definir qué parámetros se van a reajustar para aumentar el factor de seguridad.

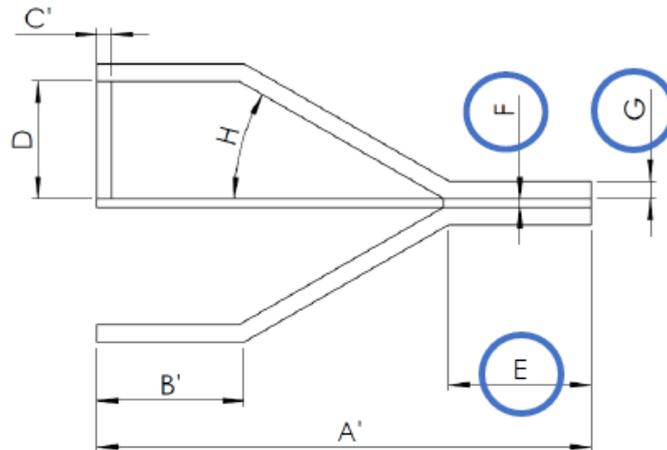


Figura 48. Croquis de los parámetros E, F y G. Fuente propia.

Se ha decidido reajustar los siguientes parámetros:

- **Parámetro G (Grosor de la estructura)**

Tabla 12. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro G. Fuente propia.

	Medida anterior [mm]	Medida definitiva [mm]
Reajuste del parámetro G	2	3

A partir de la tabla 12 se puede observar que el factor de seguridad tiene una tendencia creciente y exponencial. Por ello, se decide modificar este parámetro, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13. Resultados obtenidos al reajustar el parámetro G. Fuente propia.

Reajuste parámetro G [mm]	Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedio de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
3,00	1,13E-04	1,13E-03	-2,24E-05	-2,24E-04	1,99E+06	1,99E+07	1,47E+07	1,47E+08	15,95	1,60

Se observa que, al aumentarse el factor de seguridad, también disminuyen considerablemente las deformaciones que se producen en los piezoeléctricos, por lo tanto, para encontrar una geometría más óptima se modifican conjuntamente los parámetros E y F.

- **Parámetro E** (Longitud de las extremidades del transductor) y **parámetro F** (Grosor de la pletina de aluminio)

Tabla 14. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro E. Fuente propia.

	Medida anterior [mm]	Medida definitiva [mm]
Reajuste del parámetro E	30	25

Al reajustar el parámetro E se puede predecir a partir de la tabla 7 que no se producirán cambios notables en cuanto a deformaciones o tensiones equivalentes se refiere, simplemente se reducirá ligeramente el factor de seguridad. Además, se conseguirá reducir el uso de material y en consecuencia el coste.

Tabla 15. Dimensiones utilizadas para reajustar el parámetro F. Fuente propia.

	Medida anterior [mm]	Medida definitiva [mm]
Reajuste del parámetro F	2	1,5

Para aumentar las deformaciones producidas en la superficie de los piezoeléctricos, se modifica el parámetro F. De forma que la pletina de aluminio admitirá mucha más flexión y por lo tanto se generará una mayor deformación y generación de energía. Por otro lado, se reducirá el factor de seguridad, pero se ha realizado este reajuste de forma que el factor de seguridad final es de 1,5 para el paso de vehículos pesados.

Tabla 16. Resultados obtenidos con la geometría final para vehículos ligeros y pesados. Fuente propia.

	Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]	Deformación vertical [m]	Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]	Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]	Factor de seguridad de la estructura
Vehículos ligeros	1,44E-04	-2,63E-05	2,37E+06	1,56E+07	15,04
Vehículos pesados	1,44E-03	-2,63E-04	-2,63E-03	1,56E+08	1,50

Geometría definitiva

A pesar de haber realizado el estudio por simetría, en la figura 47, se muestra la geometría final completa y los resultados obtenidos.

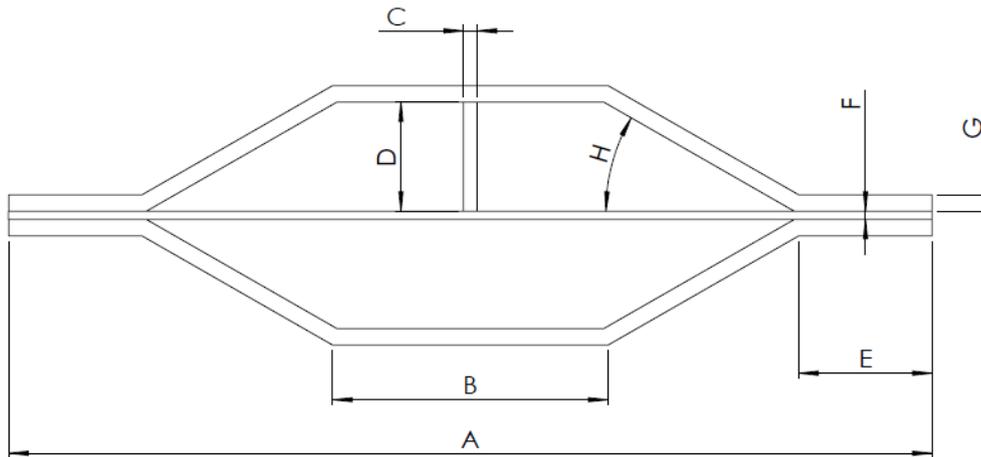


Figura 49. Croquis en que se indiquen los parámetros dimensionales de la geometría final. Fuente propia.

Tabla 17. Dimensiones de la geometría final. Fuente propia.

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	H [°]
Dimensiones de la geometría final	167,7	50	5	20	25	1,5	3	30

La geometría especificada se ha definido como la más óptima ya que es la que mayores deformaciones produce y a su vez cumple con el objetivo de que el factor de seguridad mínimo tenga un valor mayor que 1, concretamente $FS=1,5$.

Tal y como se ha comentado al inicio de “3. Modelización numérica”, la zona crítica del transductor piezoeléctrico es la parte superior central, ya que es la zona que está sometida a más esfuerzos y mayores flexiones. Por lo tanto, en este punto se encontrará la tensión máxima de la estructura y el factor de seguridad mínimo al que está sometida.

3.2 Modelo para la optimización de la posición del bridge en 2D

Una vez determinado el diseño óptimo del transductor, se ha simulado su implementación en el pavimento. Estudiando su posición y la posición de aplicación de las cargas en dos tipos distintos de pavimento.

3.2.1 Geometría/variables a optimizar

Tipos de pavimentos estudiados

En esta parte del estudio se analizará la implementación del transductor piezoeléctrico en dos tipos distintos de pavimento, que en la simulación constan de un ancho de 3m para simular la amplitud de la calzada. Generalmente, las secciones de firme se clasifican según la categoría de tráfico pesado y la categoría de explanada. A continuación, se detallan los tipos de pavimento utilizado, la información ha sido extraída de la Norma 6.1-IC “Secciones de firme”.

- **Pavimento para tráfico ligero**

En este caso se ha decidido implementar el transductor piezoeléctrico en una sección de firme **4211**. Las dos primeras cifras indican que la categoría de tráfico pesado es la T42 y la tercera cifra indica que la categoría de explanada es la E3. La última cifra indica el tipo de firme, en este caso, se trata de una mezcla bituminosa sobre una capa granular.

A continuación, se encuentra la configuración básica de la sección de firme 4211:

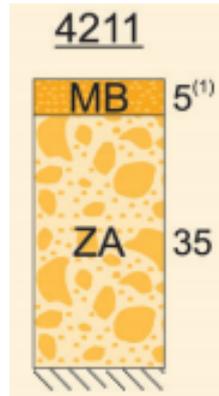


Figura 51. Configuración básica de la sección de firme 4211. Obtenido de [45]



Figura 50. Leyenda para interpretar los materiales utilizados en la sección de firme 4211 y 0032. Obtenido de [45]

La configuración del pavimento utilizada exactamente en las simulaciones es la siguiente:

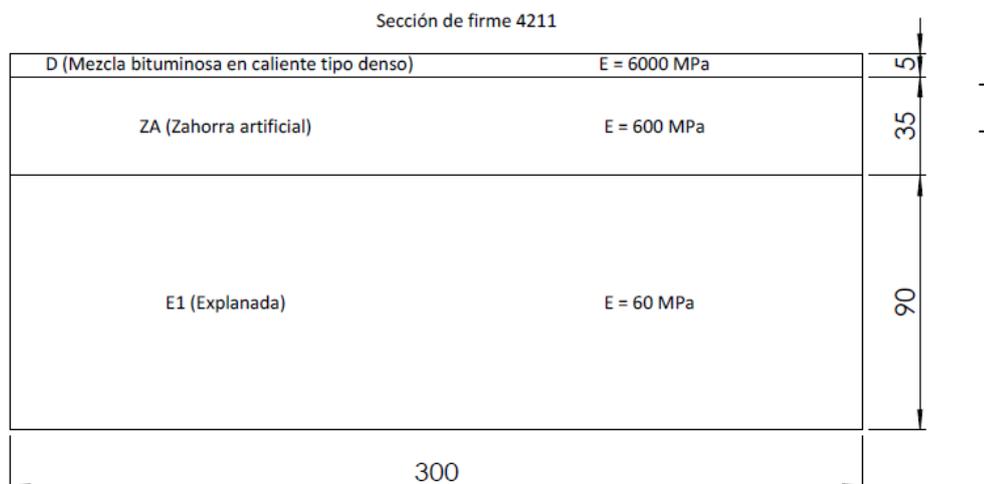


Figura 52. Configuración de la sección 4211 utilizada. Se indican las medidas de cada capa en cm y sus respectivos módulos de Young. Fuente propia.

- **Pavimento para tráfico pesado**

En este caso se ha decidido implementar el transductor piezoeléctrico en una sección de firme **0032**. Las dos primeras cifras indican que forma parte de la categoría de tráfico pesado T00 y la tercera cifra indica que la categoría de explanada es la E3. La última cifra hace referencia al tipo de firme, en este caso, en este caso se trata de una mezcla bituminosa sobre suelo cemento.

A continuación, se observa la configuración básica de este tipo de firme:

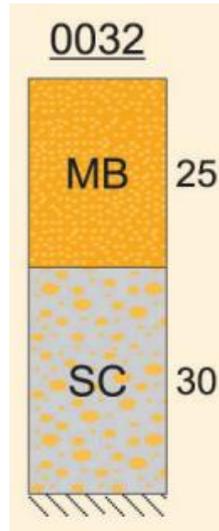


Figura 53. Configuración básica de la sección de firme 0032. Obtenido de [45]

La configuración utilizada exactamente en la parte experimental es la siguiente:

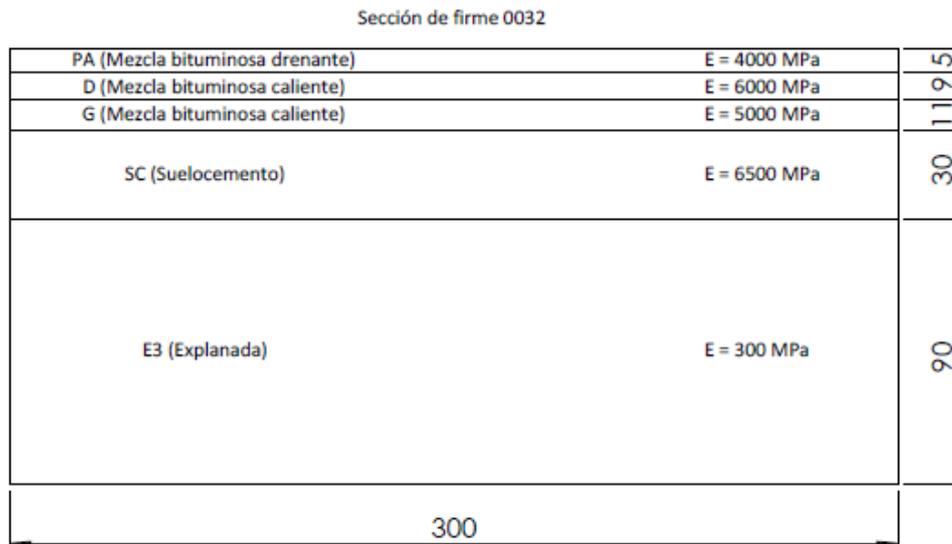


Figura 54. Configuración de la sección 0032 utilizada. Se indican las medidas de cada capa en cm y sus respectivos módulos de Young. Fuente propia

Inicialmente, la primera capa de la figura 54 tenía un espesor de 4 cm y la segunda capa uno de 10 cm. Estos valores se han modificado para que el transductor piezoeléctrico, que tiene una altura total de 4,75 cm, pueda colocarse completamente en la primera capa del pavimento. Por lo tanto, se ha aumentado el espesor de la primera capa y reducido el de la segunda para cumplir con la normativa, ya que las capas de mezcla bituminosa no pueden sobrepasar un espesor de 25 cm en total.

Profundidad de implantación en el pavimento

Por otro lado, se estudiará la posición óptima del transductor en cada uno de los pavimentos.

La idea principal era realizar una simulación colocando el transductor en una posición lo más cercana posible de la superficie manteniendo 1 o 2 mm de distancia con la superficie superior del pavimento. Y, por otro lado, realizar una simulación en la que el transductor se encuentre en la primera capa del asfalto, pero lo más alejado posible, es decir, manteniendo 1 o 2 mm de distancia respecto al final de la primera capa del pavimento.

Puesto que la primera capa de ambos pavimentos mide 5 cm y el transductor piezoeléctrico tiene una altura total de 4,75 cm, disponemos de un rango muy pequeño de opciones a la hora de situar el transductor en la primera capa del pavimento.

Finalmente, y para simplificar el estudio, se ha decidido situar el transductor justo en medio de la capa de pavimento, de forma que queda situado a 1,25 mm de la superficie superior del pavimento y 1,25 mm de la parte inferior de la primera capa del pavimento.

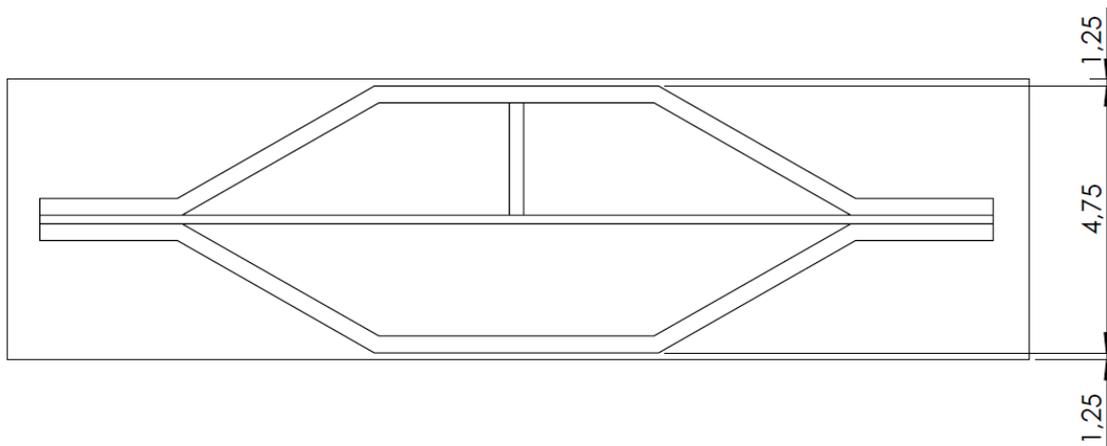


Figura 55. Colocación del transductor piezoeléctrico en el pavimento. Medidas en milímetros. Fuente propia.

Posición de las cargas aplicadas

Por otro lado, se ha estudiado la influencia que tiene la distancia a la que se aplica la carga.

Para ello, se han estudiado dos situaciones distintas para cada uno de los tipos de pavimentos:

- 1- **Carga centrada:** Se estudia la carga aplicada directamente aplicada sobre la zona en la que se encuentra posicionado el transductor piezoeléctrico. De esta forma, se pretende simular el paso del neumático sobre la zona de pavimento dónde se encuentra simulado el transductor. Para simular el esfuerzo que hacen las ruedas sobre el pavimento, se ha estimado que la huella de un neumático tiene un ancho de 20 cm.

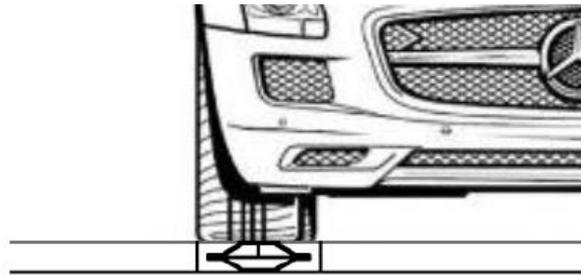


Figura 56. Neumático pasando por encima del transductor (Carga centrada). Fuente propia.

- 2- **Carga descentrada:** Se estudia la posición más alejada que puede haber desde la rueda de un vehículo hasta la zona en la que se encuentra el transductor. Esta posición, equivale a la posición en la que el punto central del eje de las ruedas de un vehículo coincide con la posición en la que está colocado el transductor, ya que, en este instante, será cuando la posición de ambas ruedas esté lo máximo posible alejada del transductor.

Para ello, se ha estimado que la distancia que hay entre el centro del eje y el centro de un neumático es de aproximadamente 75 cm, se ha tomado este valor promedio teniendo en cuenta que por la carretera circulan vehículos ligeros de distintos tamaños y vehículos pesados de grandes dimensiones.

Igual que en el estudio de las cargas centradas, se ha estimado que la huella de un neumático tiene un ancho de 20 cm.

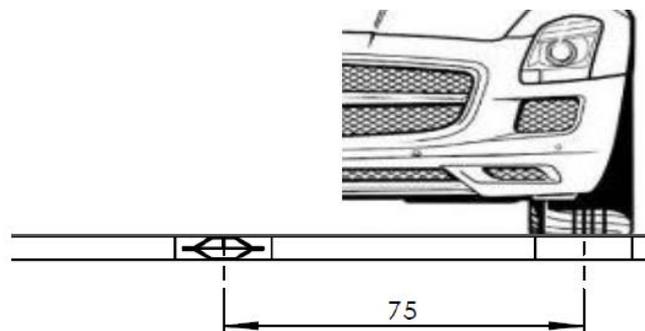


Figura 57. Neumático pasando a 75 cm del transductor (Carga descentrada). Fuente propia.

3.2.2 Condiciones de contorno, contactos y cargas

Igual que en las simulaciones anteriores se aplica el contacto *bonded* entre todos los sólidos que forman el cuerpo, para que el programa los trate como un solo sólido.

En la Figura 56 se puede observar que el pavimento está dividido en partes, esto se ha hecho así para simplificar la aplicación de cargas en el programa ANSYS, ya que, así se pueden seleccionar directamente los 20 cm de superficie sobre los que actúa la presión producida por el neumático, ya sea de forma centrada o descentrada. La realización de estas particiones no supone ningún inconveniente en los resultados gracias a la aplicación de contactos *bonded* que, como ya se ha dicho, hace que el programa entienda las distintas particiones como un mismo sólido.

En la normativa 6.1-IC "Secciones de firme" y en la figura 50 y la figura 52 se puede observar que ambos tipos de pavimento deben estar fijos al suelo. Por lo tanto, está será una de las condiciones de contorno que se aplicaran al contorno.

Tal y como se ha explicado anteriormente, en todas las simulaciones el transductor piezoeléctrico se va a ubicar en medio de la primera capa de los pavimentos. Además, se van a analizar diversas situaciones de posición de carga para ambos pavimentos. A nivel de condiciones, de contorno se pueden distinguir dos grupos distintos:

- **Pavimento ligero y pavimento pesado con la carga centrada** (para vehículos ligeros y pesados)

- A** Pressure: 1,e+006 Pa
- B** Fixed Support

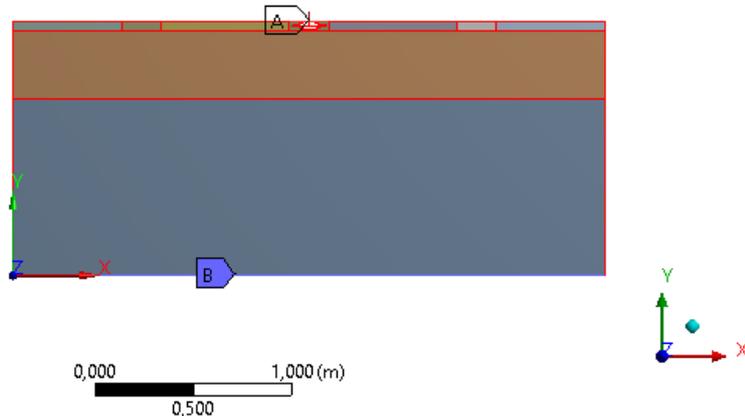


Figura 58. Condiciones de contorno de una simulación de pavimento ligero y carga centrada para vehículos pesados.
Fuente propia.

El pavimento se encuentra fijo con un empotramiento, que impide el giro del sólido y los desplazamientos que se puedan producir tanto vertical (eje Y) como horizontalmente (eje X). Por otro lado, la carga se aplica directamente en la superficie de 20 cm que se encuentra justo encima del transductor piezoeléctrico (figura 56). La carga esta aplicada verticalmente y toma un valor negativo de 1E+005 Pa para vehículos ligeros y 1E+006 Pa para vehículos pesados.

- **Pavimento ligero y pavimento pesado con la carga descentrada** (para vehículos ligeros y pesados)

- A** Fixed Support
- B** Pressure: 1,e+006 Pa

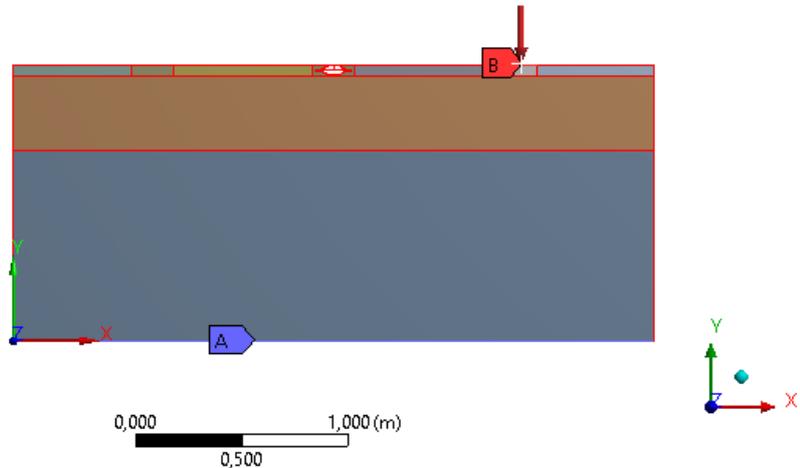


Figura 59. Condiciones de contorno de una simulación de pavimento ligero y carga descentrada para vehículos pesados. Fuente propia.

Igual que en el caso anterior, el pavimento se encuentra fijo con un empotramiento, por lo tanto, se impide su giro y sus desplazamientos en dirección vertical y horizontal. La carga también se aplica verticalmente y toma valores negativos (los mismos que para el caso anterior). La principal diferencia es la posición de aplicación de la carga, en este caso se aplica a 75 cm del centro del transductor piezoeléctrico (figura 57), también sobre una superficie de 20 cm que equivale a la huella del neumático y por lo tanto simboliza la superficie de contacto entre el pavimento y el neumático.

3.2.3 Mallado

Para optimizar el mallado y simplificar el proceso de la simulación. Se han realizado tres tipos de mallado con diferentes magnitudes.

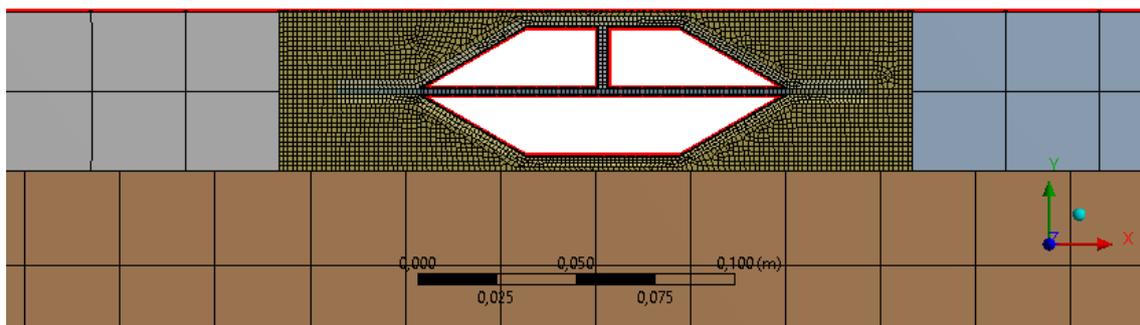


Figura 60. Mallado realizado en la implantación del transductor piezoeléctrico en el pavimento. Fuente propia.

La malla más refinada se encuentra situada en toda la estructura del transductor piezoeléctrico, ya que los resultados más importantes a la hora de realizar el estudio son los que se obtienen sobre la estructura del transductor y no sobre el pavimento.

Por otro lado, se ha realizado un mallado intermedio, que se encuentra situado en el pavimento que rodea el transductor, ya que también es una zona en la que puede interesar en un futuro ver que esfuerzos o deformaciones se generan. Realmente, este mallado tiene unas dimensiones muy similares a la malla de la estructura, por lo tanto, sería válido aplicar las mismas dimensiones ya que al no estudiar los efectos que se producen en esta zona del pavimento, los resultados obtenidos no se van a ver afectados por este factor.

Finalmente, se ha realizado un mallado más amplio en toda la resta de pavimento, ya que en el estudio no interesa analizar la influencia que tienen las cargas en los puntos más alejados del transductor. Y de esta forma, se consigue que el programa ANSYS ejecute de forma mucho más rápida una solución.

3.2.4 Resultados

A continuación, se muestran los distintos resultados obtenidos al realizar las simulaciones para pavimento para tráfico ligero y pesado, teniendo en cuenta la posición de aplicación de las cargas y el paso de vehículos ligeros y pesados. A partir de este análisis se pretende definir la posición óptima de las cargas aplicadas para cada tipo de sección de firme.

Pavimento para tráfico ligero (Para vehículos ligeros y pesados)

Tabla 18. Resultados obtenidos al estudiar la posición de aplicación de las cargas en pavimento para tráfico ligero. Fuente propia.

Transductor situado en pavimento para tráfico ligero										
Posición de la carga	Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
Centrada	1,19E-05	1,19E-04	-2,09E-04	-2,09E-03	2,11E+06	2,11E+07	2,01E+07	2,01E+08	11,66	1,17
Descentrada	1,71E-05	1,71E-04	-8,41E-05	-8,41E-04	2,68E+05	2,68E+06	1,59E+06	1,59E+07	147,85	14,78

Pavimento para tráfico pesado (Para vehículos ligeros y pesados)

Tabla 19. Resultados obtenidos al estudiar la posición de aplicación de las cargas en pavimento para tráfico pesado. Fuente propia.

Transductor situado en pavimento para tráfico pesado										
Posición de la carga	Deformación promedia en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Deformación vertical [m]		Tensión equivalente promedia de la estructura [Pa]		Tensión equivalente máxima de la estructura [Pa]		Factor de seguridad de la estructura	
	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
Centrada	5,82E-05	5,82E-04	-3,96E-05	-3,96E-04	1,20E+06	1,20E+07	3,15E+07	3,15E+08	7,45	0,75
Descentrada	5,79E-06	5,79E-05	-1,82E-05	-1,82E-04	6,43E+04	6,43E+05	2,91E+05	2,91E+06	806,73	80,67

Análisis de los resultados obtenidos

Esto es debido, a que el transductor se encuentra situado a 1,25 mm de la superficie, y, cuando la carga se aplica en una posición centrada, actúa directamente encima del transductor y transmite mayores esfuerzos y deformaciones.

Por otro lado, cuando la carga se aplica de forma descentrada, se generan muchas menos deformaciones, sobre todo deformaciones verticales. Además, las tensiones equivalentes resultantes son mucho menores que cuando la carga se aplica centrada, y, por lo tanto, los factores de seguridad son muy elevados. Al obtener factores de seguridad tan elevados, de que la estructura definida como óptima cuando actúa para estas situaciones, está sobredimensionada, es decir, en estos casos la estructura no se consideraría óptima.

También, podemos observar que al implementar el transductor piezoeléctrico en el pavimento se disminuyen considerablemente las tensiones y deformaciones comparado con el estudio realizado anteriormente a la hora de diseñar la geometría óptima del transductor. Esto es debido, a que el pavimento es un material mucho más rígido y que, por lo tanto, no permite tanta flexión y deformaciones.

Además se observa que para el pavimento para tráfico pesado se generan deformaciones y tensiones equivalentes mucho mayores que en el pavimento para tráfico ligero. Esto produce, que para el caso de aplicar una carga centrada en el pavimento para tráfico pesado y simulando el paso de vehículos pesados, el factor de seguridad de la estructura sea menor que 1 y por lo tanto rompa.

De todas formas, hay distintas formas de aumentar este factor de seguridad, como por ejemplo cambiando el tipo de acero, situar el transductor piezoeléctrico en una posición un poco más alejada de la superficie del pavimento (2mm) o si fuese necesario, en último lugar, modificar algunas de las dimensiones del transductor piezoeléctrico de forma que cuando se le aplica la carga directamente sin estar implementado en el pavimento, el factor de seguridad que tenga sea superior a 1,5.

Pese a obtener un factor de seguridad inferior a uno, se va a continuar con el estudio, ya que realizar alguno de las soluciones nombradas anteriormente supondría realizar parte del proyecto de nuevo. Además, se considera importante mantener estos resultados, ya que son consecuencia directa de decisiones que se han tomado anteriormente, como por ejemplo, definir un factor de seguridad inicial de 1,5.

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que la posición óptima de las cargas es cuando están centradas encima del transductor piezoeléctrico y de que en el pavimento de tráfico pesado la estructura se encuentra mucho más solicitada.

3.3 Modelo para la modelización de la salida eléctrica (3D)

Una vez se ha definido la posición de instalación del transductor tipo Bridge en el pavimento y se han estudiado los resultados obtenidos para los distintos tipos de pavimento y disposición de las cargas aplicadas, se utiliza el diseño que mejores resultados aporta para simular la salida eléctrica que genera el transductor mediante el programa ANSYS.

En este caso, se va a modelar la salida eléctrica para la posición de cargas centrada, que es la que mejores resultados ha generado, tanto para pavimentos de tráfico ligero y pesado y en ambos casos teniendo en cuenta el paso de vehículos ligeros y pesados.

3.3.1 Geometría/variables a optimizar

En primer lugar, esta parte del estudio se debe realizar en 3D, este factor es una imposición que proviene del programa ANSYS para poder estudiar el efecto piezoeléctrico correctamente.

Tal y como se ha comentado al inicio del apartado “3. Modelización numérica”, el piezoeléctrico utilizado es el P876 A12 de cerámica PIC255. Generalmente, las cerámicas piezoeléctricas van recubiertas por una capa de resina (figura 59), pero, en este caso se va a simplificar el diseño simulando simplemente la cerámica piezoeléctrica. Este factor no producirá variaciones significantes en el resultado.

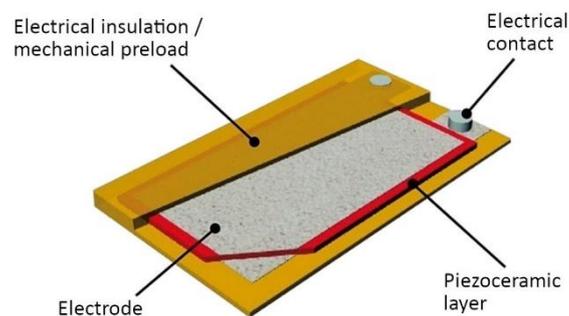


Figura 61. Partes de una cerámica piezoeléctrica. Obtenido de [41]

Para aprovechar al máximo el rendimiento del transductor piezoeléctrico, la geometría tipo Bridge permite implementar dos cerámicas piezoeléctricas en una misma estructura. Ambas cerámicas se colocan en la pletina de aluminio central, una en la parte superior y la otra en la parte inferior.

Las características de la cerámica piezoeléctrica son las siguientes:

Tabla 20. Propiedades de la cerámica piezoeléctrica PIC255. Fuente propia.

PROPIEDADES	Cerámica PIC255
Densidad [Kg/m ³]	7,80E+03
Modulo de Young [Pa]	9,71E+10
Coefficiente de Poisson	0,36

Al realizar la simulación en 3D, también hay que estimar la huella que causan los neumáticos de los vehículos sobre la superficie de los pavimentos. La huella de un neumático suele tener una forma ovalada, que además depende directamente de la presión que contiene el mismo, es decir, depende de lo hinchado que esté el neumático [Figura 60].



Figura 62. Superficie de contacto de un neumático en función de la presión que contiene. Obtenido de [46]

Por lo tanto, para simplificar la superficie de contacto del neumático con el pavimento se ha decidido que la huella tendrá una superficie de contacto de 400 cm^2 en forma de cuadrado, es decir, la huella se estará representada por un cuadrado con costados de 20 cm .

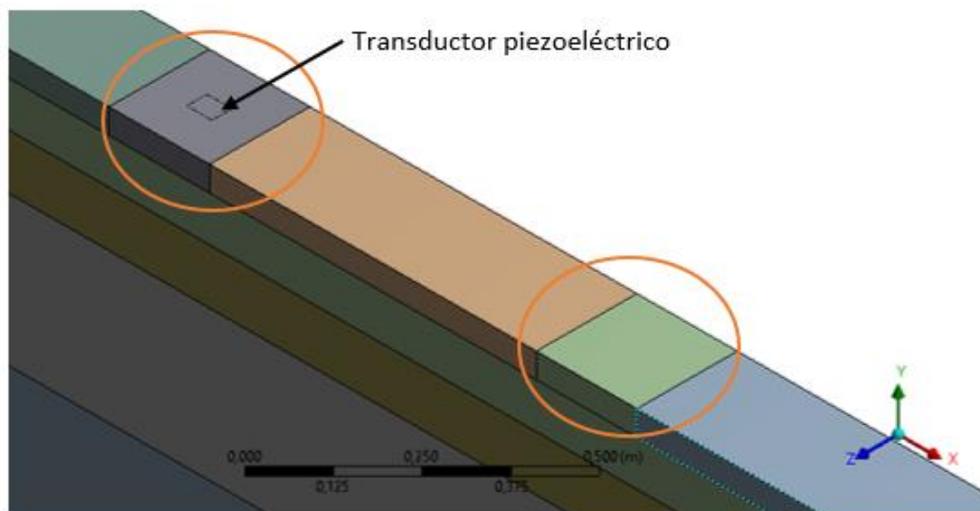


Figura 63. Superficie cuadrada de costados de 20 cm que representa la huella del neumático en 3D.
Fuente propia.

Para poder aplicar el efecto piezoeléctrico uno de los factores importantes es indicar el eje de polarización de las cerámicas piezoeléctricas, en este caso tendrá una dirección perpendicular a la posición de las cerámicas. Por lo tanto, en las simulaciones realizadas, el eje de polarización es el eje Z. (Figura 62)

■ Piezoelectric Body

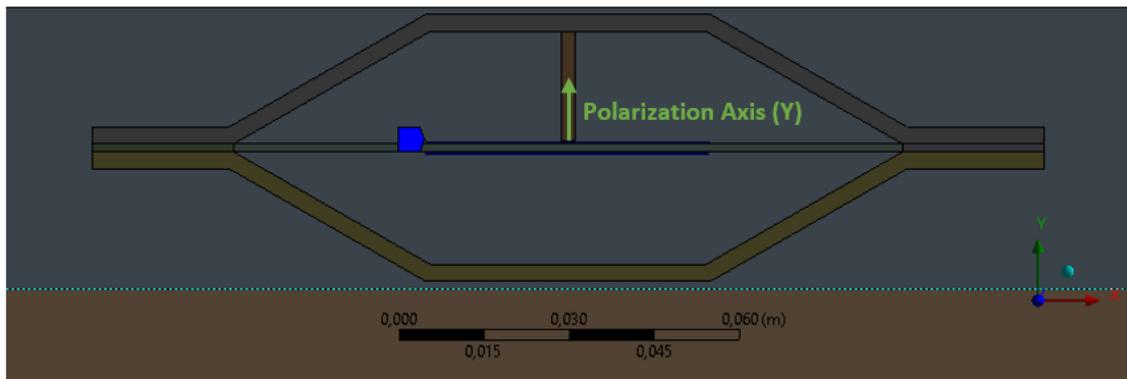


Figura 64. Eje de polarización de las cerámicas piezoeléctricas. Fuente propia.

Una vez indicado y determinado el eje de polarización, se deben introducir en ANSYS las diferentes características de polarización que tiene la cerámica, son las siguientes:

Tabla 21. Coeficientes piezoeléctricos de la cerámica PIC255. Fuente propia.

Coeficientes piezoeléctricos de la cerámica PIC255	Valor	Unidades
e31	-7,15	N/Vm
e33	13,7	N/Vm
e15	11,9	N/Vm
ep11	930	-
ep33	857	-

Una vez definidos los coeficientes piezoeléctricos de la cerámica, se indica en qué lugar de la cerámica se encuentra el voltaje 0. En este caso, se seleccionan las superficies de la cerámica piezoeléctrica que están pegadas a la pletina de aluminio, de forma que el voltaje resultante de un valor positivo. Si se seleccionan las caras contrarias, no supone ningún problema, porque lo que importa es conocer el valor final del voltaje en valor absoluto.

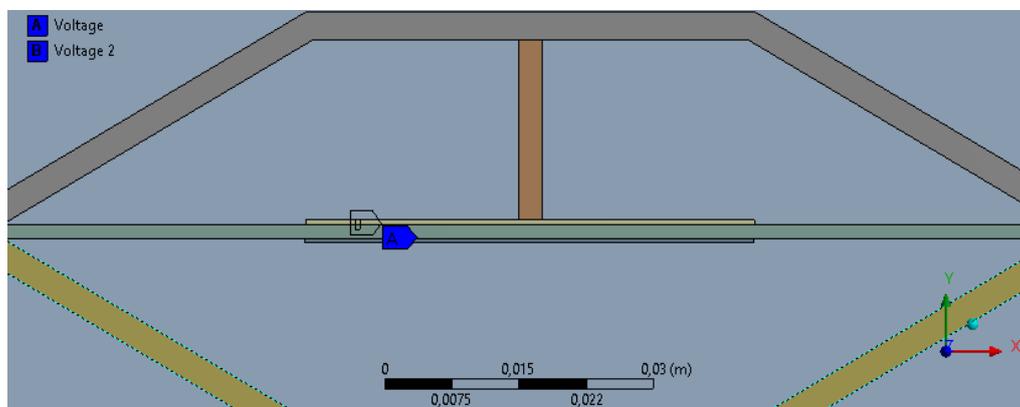


Figura 65. Superficies de las cerámicas piezoeléctricas en las que se aplica un voltaje 0. Fuente propia.

Finalmente, se aplica una condición de contorno de voltaje acoplado entre las dos cerámicas piezoeléctricas. Para cada una de las cerámicas se seleccionan las superficies más alejadas de la pletina de aluminio, esta acción permite indicar al programa que en ambas superficies seleccionadas debe haber el mismo voltaje. Los resultados obtenidos nos proporcionaran el voltaje calculado en estas superficies de las cerámicas piezoeléctricas.

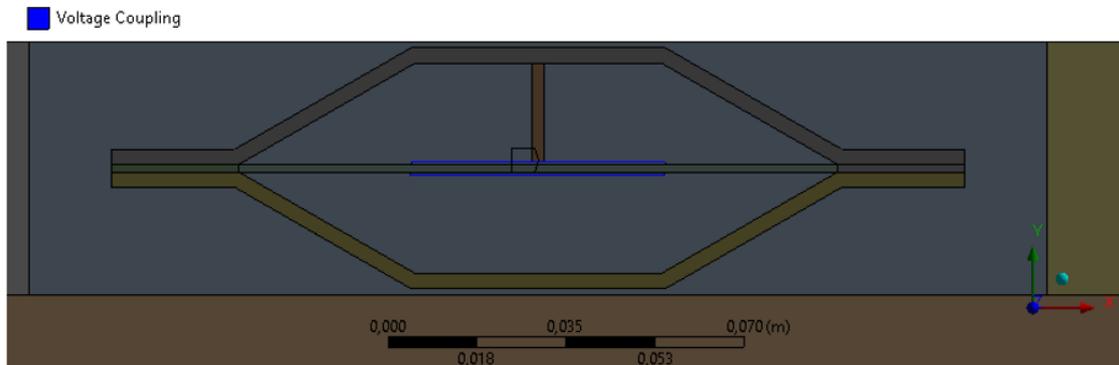


Figura 66. Superficies de las cerámicas piezoeléctricas en las que se realiza la acción de voltaje acoplado. Fuente propia.

3.3.2 Condiciones de contorno, contactos y cargas

En estas simulaciones, igual que en las realizadas anteriormente, se aplica el contacto *bonded* entre todos los sólidos del conjunto. Las simulaciones realizadas anteriormente estaban en 2D y, por lo tanto, el contacto se realizaba entre los bordes de cada pieza.

En este caso, el conjunto se encuentra en 3D, y, por lo tanto, el contacto *bonded* se debe aplicar entre las superficies de contacto que hay entre sólidos. De forma que el programa asuma todo el conjunto 3D como un mismo sólido.

Como ya se ha dicho, en este apartado se realizarán as simulaciones con una posición del transductor piezoeléctrico centrado en la primera capa de pavimento y con una posición centrada de la carga, que como ya se ha visto, es la opción más óptima.

A continuación, se observan las condiciones de contorno aplicadas en el modelo 3D:

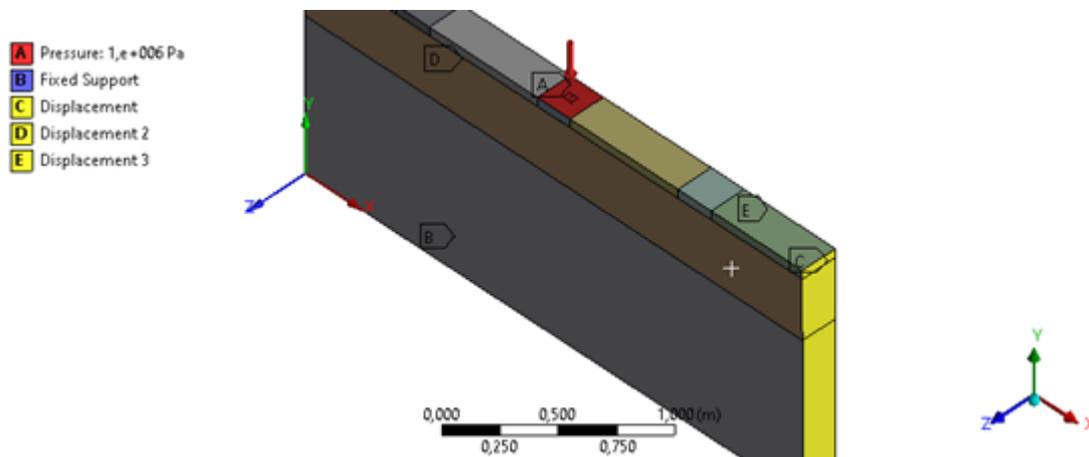


Figura 67. Condiciones de contorno en el modelo en 3D para modelizar la salida eléctrica de la aplicación de la carga centrada. Pavimento de tráfico ligero y valor de la carga para vehículos pesados. Fuente propia.

En la figura 65, se observa que se han aplicado un gran número de condiciones de contorno con el objetivo de garantizar que el conjunto no se desplaza por los planos delimitantes.

En primer lugar, se ha añadido un contacto fijo en la parte inferior que evita el desplazamiento en cualquiera de las tres direcciones (X, Y, Z). Por otro lado, se ha aplicado una condición de contacto en los laterales del conjunto que impide el desplazamiento de éste en la dirección X. Finalmente, se han aplicado condiciones de contacto en la parte delantera y trasera del conjunto que impiden el movimiento a lo largo de la dirección Z. De esta forma, se restringe el movimiento del pavimento a lo largo de los distintos ejes.

Por otro lado, la carga centrada se aplica en la superficie cuadrada que hay justo encima del transductor piezoeléctrico, de forma que se simula la huella y superficie de contacto de un neumático. Igual que en todas las simulaciones realizadas anteriormente, la carga estará aplicada verticalmente, con sentido negativo y tendrá un valor de $1E+005$ Pa durante el paso de vehículos ligeros y un valor de $1E+006$ Pa durante el paso de vehículos pesados.

3.3.3 Mallado

El mallado del modelo en esta parte del estudio se realiza de forma análoga al mallado que se realiza para estudiar la posición del transductor piezoeléctrico en el asfalto en el modelo en 2D.

La estructura del transductor y las cerámicas piezoeléctricas se mallan con una malla más refinada, para obtener unos resultados más reales y acertados, ya que, nos interesa saber las deformaciones, tensiones y factor de seguridad que se produce en el transductor.

El volumen de pavimento que rodea la estructura se realiza con unas dimensiones de mallado intermedia, ya que está en contacto directo con el transductor y en este caso también con la carga aplicada, por lo tanto, nos interesan que los resultados en esta zona sean precisos.

Finalmente, en el resto del modelo se ha aplicado un mayado de dimensiones superiores, ya que no se considera necesario saber los resultados que genera la carga aplicada en las zonas del pavimento más alejadas del transductor.

De esta forma, se consigue optimizar el mallado y se reduce el tiempo de la simulación.

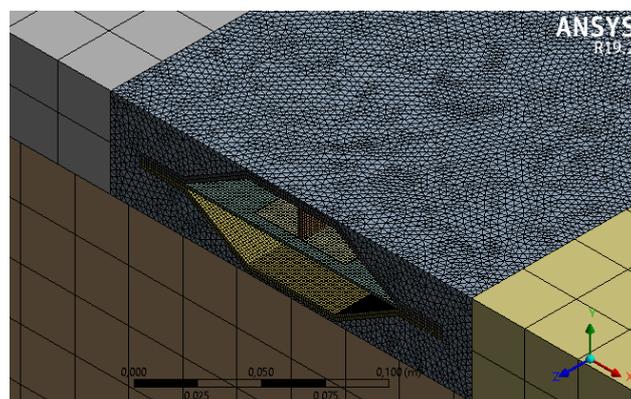


Figura 68. Mallado realizado en el modelo en 3D. Fuente propia.

3.3.4 Resultados

En este apartado, se muestra la generación de voltaje que proporcionan los dos sistemas estudiados. En primer lugar, la aplicación de una carga centrada sobre pavimento para tráfico ligero y, en segundo lugar, la aplicación de una carga centrada sobre pavimento para tráfico pesado.

Tabla 22. Modelización de la salida eléctrica para la aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico ligero. Fuente propia.

Aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico ligero											
Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior) [m/m]		Generación de voltaje en la cerámica superior [V]		Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Inferior) [m/m]		Generación de voltaje en la cerámica inferior [V]		Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Generación de voltaje total [V]	
Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
-1,10E-05	-1,10E-04	4,54	45,42	-9,55E-06	-9,55E-05	3,79	37,90	2,06E-05	2,06E-04	8,33	83,32

Tabla 23. Modelización de la salida eléctrica para la aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico pesado. Fuente propia.

Aplicación de una carga centrada en pavimento para tráfico pesado											
Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior) [m/m]		Generación de voltaje en la cerámica superior [V]		Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Inferior) [m/m]		Generación de voltaje en la cerámica inferior [V]		Deformación promedio en la superficie de los piezoeléctricos (Superior e inferior) [m/m]		Generación de voltaje total [V]	
Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados	Vehículos ligeros	Vehículos pesados
-1,29E-06	-1,29E-05	0,60	5,95	2,04E-06	2,04E-05	0,99	9,91	3,34E-06	3,34E-05	1,59	15,86

A partir de los resultados anteriores, se puede observar que tal y como se esperaba, en algunos casos los valores de la señal eléctrica generada son muy pequeños. Por lo tanto, la señal eléctrica generada no puede alimentar sistemas que necesiten mucha energía, ya que, no proporciona la suficiente intensidad.

Al aplicar una carga centrada en las simulaciones realizadas en 2D, se ha observado que en el pavimento para tráfico pesado se producen mayores deformaciones que en el pavimento para tráfico ligero (tabla 18 y tabla 19). En cambio, en el estudio realizado en 3D, se observa completamente lo contrario, ya que, la simulación en 3D aporta resultados mucho más precisos.

Por lo tanto, el pavimento para tráfico ligero presenta resultados más favorables, ya que, es más flexible, hecho que permite que se produzcan deformaciones mayores y, consecuentemente, una mayor generación de voltaje total obtenido.

Suponiendo que la velocidad máxima de un vehículo es de 120 Km/h, se llega a la conclusión de que pasa por los 20cm de huella y los 10 cm que ocupa el transductor en un tiempo de $t=0.009s$.

$$v = \frac{x}{t} \rightarrow t = \frac{x}{v} \rightarrow t = \frac{0,0003 \text{ km}}{120 \text{ km/h}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = \mathbf{0,009 \text{ s}}$$

Si se conecta el piezoeléctrico a una resistencia óptima de consumo, que según estudios previos tienen un valor de 230 Kohm, se genera una potencia de:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{8,33^2 \text{ V}}{230000 \text{ } \Omega} = \mathbf{301,7 \text{ } \mu\text{W}}$$

Además, la generación de energía sube y baja durante el paso de cada rueda, por lo tanto, cada rueda que pasa genera una energía de:

$$E = \frac{1}{2} * P * t = \frac{1}{2} * 301,7 \mu\text{W} * 0,009\text{s} = \mathbf{1,35 \text{ } \mu\text{J}}$$

Suponiendo que en una carretera a diario circulan un promedio de 22.000 vehículos, y que, por cada uno de ellos hay dos ruedas que generan esfuerzos sobre el transductor piezoeléctrico, se genera una energía total de:

$$2 * 25000 * 1,35 \mu\text{J} = 67500 \mu\text{J} = \mathbf{67,5 \text{ mJ}}$$

Que, dividido en un día, que tiene 86400 s, se estima que se puede tener conectado constantemente un consumidor de $0,781 \text{ } \mu\text{W}$.

Por lo tanto, para alimentar un Arduino de unos 100 mW, serían necesarios 128000 transductores piezoeléctricos. Si se estima que el coste de cada uno es de unos 60€, para hacer funcionar un Arduino se debería invertir un total de:

$$128000 \text{ piezoeléctricos} * 60 \text{ €} = \mathbf{7680000 \text{ €}}$$

Se llega a la conclusión de que el sistema no es efectivo ni aplicable para consumidores constantes. Sin embargo, sí que resulta un sistema efectivo para pequeños consumidores puntuales.

Por otro lado, teniendo en cuenta que, con el paso de un solo coche y durante un segundo, el transductor genera una energía de $301,7 \text{ } \mu\text{W}$, serían necesarios 332 piezoeléctricos y una inversión de 19.920€ para hacer funcionar un Arduino mientras pasa el coche.

4. RESUMEN ECONÓMICO

A la hora de realizar el presupuesto final del proyecto se han tenido en cuenta tanto los costes de personal como los costes de software y hardware utilizados.

- **Costes de personal**

Se estima que, entre el tiempo de investigación, tiempo de redacción del proyecto y tiempo de ejecución de las simulaciones numéricas se han invertido un total de 600h aproximadamente. Teniendo en cuenta un precio por hora de 10€/hora, los costes de personal tendrían un valor de 6000 €.

- **Costes de software y hardware**

Los softwares utilizados principalmente para la realización del proyecto han sido:

- SolidWorks para modelar cada uno de los componentes del ensamblaje.
Precio: 800 € / 3 meses de licencia. En este caso, utilizar una licencia de 3 meses es suficiente para realizar el proyecto.
- ANSYS Workbench para realizar las simulaciones numéricas.
Precio: 850 €/4 meses de licencia, es decir, cubre la duración de todo el proyecto.
- Microsoft Office para redactar el proyecto y realizar las tablas de resultados pertinentes.
Precio: 4,20 €/mes. Teniendo en cuenta que el transcurso del proyecto ha durado 4 meses el precio definitivo es: 16,8 €.

El coste del equipo informático es aproximadamente de 800€.

- **Presupuesto final**

Tabla 24. Tabla de costes. Fuente propia.

Costes de personal	6000
Costes de software y hardware	---
SolidWorks	800
Ansys	850
Microsoft Office	16,8
Equipo informático	800
Presupuesto final	8466,8

5. PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN

Al inicio del proyecto, se realizó un diagrama de Gantt con el objetivo de definir y organizar las distintas tareas previstas, así como el tiempo en que se llevarían a cabo (Figura 67).

Tareas	Inicio	Final	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
Sesión informativa TFG	19/02/2020	19/02/2020	■																			
Investigación y recopilación de información	21/02/2020	04/06/2020	■	■	■							■	■	■	■	■	■	■				
Definir índice del proyecto	28/02/2020	12/03/2020		■	■	■																
Realización de simulaciones numéricas y recopilación de resultados	24/02/2020	06/04/2020		■	■	■	■	■	■	■												
Análisis de resultados y comparación de resultados para definir el diseño más óptimo	01/04/2020	01/05/2020							■	■	■	■	■									
Implementación del diseño más óptimo en pavimento y análisis de resultados (Simulación)	01/05/2020	15/05/2020											■	■	■							
Cálculo de la diferencia de potencial que se genera	16/05/2020	31/05/2020													■	■	■	■				
Redacción del proyecto	06/04/2020	21/06/2020										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Redacción y entrega del "Project Charter"	06/03/2020	20/03/2020			■	■	■	■														
1r Seguimiento	14/04/2020	14/04/2020									■											
2n Seguimiento	05/05/2020	05/05/2020												■								
3r Seguimiento	15/05/2020	15/05/2020															■					
Entrega del proyecto	30/06/2020	30/06/2020																				■

Figura 69. Planificación inicial del proyecto. Fuente propia.

A continuación, se puede observar el tiempo que han llevado finalmente las tareas definidas:

Tareas	Inicio	Final	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
Sesión informativa TFG	19/02/2020	19/02/2020	■																			
Investigación y recopilación de información	21/02/2020	25/05/2020	■	■	■							■	■	■	■	■	■	■				
Definir índice del proyecto	28/02/2020	12/03/2020		■	■	■																
Realización de simulaciones numéricas y recopilación de resultados	24/02/2020	25/04/2020		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
Análisis de resultados y comparación de resultados para definir el diseño más óptimo	21/04/2020	24/05/2020										■	■	■	■	■						
Implementación del diseño más óptimo en pavimento y análisis de resultados (Simulación)	21/05/2020	07/06/2020													■	■	■	■				
Cálculo de la diferencia de potencial que se genera	04/06/2020	22/06/2020																				
Redacción del proyecto	06/04/2020	23/06/2020										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Redacción y entrega del "Project Charter"	06/03/2020	20/03/2020			■	■	■	■														
1r Seguimiento	14/04/2020	14/04/2020									■											
2n Seguimiento	05/05/2020	05/05/2020												■								
3r Seguimiento	15/05/2020	15/05/2020															■					
Entrega del proyecto	30/06/2020	30/06/2020																				■

Figura 70. Planificación final del proyecto. Fuente propia.

Se puede observar que la planificación planteada inicialmente, se ha visto distorsionada por diversos factores. En primer lugar, la dificultad añadida que supone el confinamiento para todos, tanto psicológicamente como a nivel de comodidades para trabajar, hacer consultas, etc. Por otro lado, no se contemplaban muchos de los impedimentos obtenidos a la hora de realizar las simulaciones, pese a haber realizado una asignatura de elementos finitos, ha sido difícil solventar todos los problemas que se presentaban en el programa y en algunos casos se ha tenido que recurrir a la ayuda del tutor. Por lo tanto, se ha invertido mucho más tiempo del esperado en la realización de simulaciones numéricas, hecho que ha ralentizado las demás tareas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como conclusión, cabe resaltar que se han cumplido todos los objetivos propuestos inicialmente, ya que, se ha conseguido definir un diseño óptimo de transductor piezoeléctrico tipo Bridge a partir de la realización de simulaciones numéricas y estudiando la afectación en los resultados de diversos factores y parámetros, como, por ejemplo, el paso de vehículos ligeros y pesados.

Se ha conseguido definir una estructura que genera la máxima deformación y tiene un FS=1,5 cuando es sometida directamente a cargas centradas que simulan el paso de vehículos pesados. Gracias a garantizar este factor de seguridad inicial, se asegura la correcta implantación del transductor en el pavimento, ya que, resiste el peso del aglomerado y especialmente, su posterior compactación.

A continuación, se observa el diseño final del transductor:

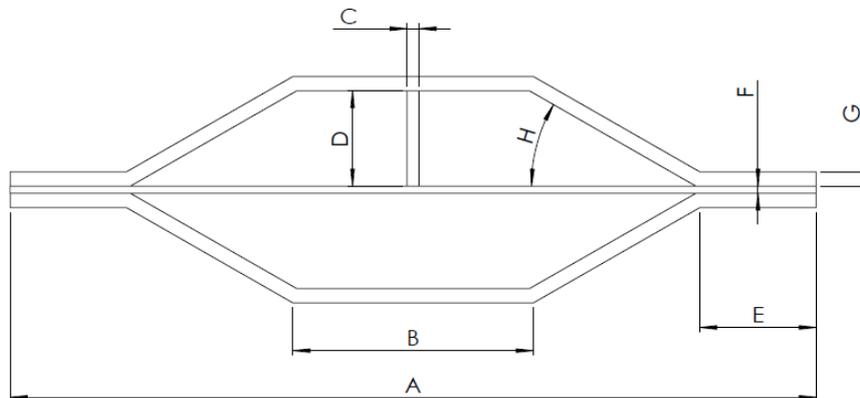


Figura 71. Croquis de la geometría final. Fuente propia.

Tabla 25. Dimensiones finales. Fuente propia.

	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]	E [mm]	F [mm]	G [mm]	H [°]
Dimensiones de la geometría final	167,7	50	5	20	25	1,5	3	30

- Reducir el grosor de la pletina de aluminio permite que se produzca una mayor flexión, y, por lo tanto, se genera una mayor deformación en la cerámica piezoeléctrica. Al utilizar una pletina de aluminio de 1,5 mm de grosor se produce el doble de deformación que al utilizar una de 3 mm.
- Reducir el grosor de las tapas del transductor permite que las cargas se transmitan de una forma más directa a la cerámica piezoeléctrica y por lo tanto genera mayores deformaciones. Reduciendo el grosor de las tapas del transductor de 3 mm a 1,5 mm, se genera aproximadamente un 12% más de deformación en el eje X en la superficie de las cerámicas piezoeléctricas.

- Estrechando el grosor de la barra vertical, se consiguen generar mayores deformaciones debido a que el momento al que se encuentra expuesto la pletina es mayor, este comportamiento es análogo al de una viga biapoyada con dos cargas puntuales aplicadas (Figura 40). Al reducir el grosor de 10mm a 5 mm se consigue aumentar un 4% aproximadamente la deformación que se genera en la superficie de los piezoeléctricos.
- Al aumentar el ángulo de la estructura, se disminuye el esfuerzo horizontal que se transmite a la parte lateral del transductor, y, por lo tanto, las deformaciones generadas también disminuyen. Utilizando un ángulo de 30º se generan 2,5 veces más deformaciones en las cerámicas piezoeléctricas que utilizando un ángulo de 60º.
- Aplicar las cargas centradas justo encima del generador, proporciona mayores deformaciones y tensiones que aplicarlas descentradas, debido a la transmisión vertical de tensiones. Cuando los neumáticos de los vehículos circulan por el centro del transductor implementado en pavimento para tráfico pesado, se generan 10 veces más deformaciones que si circulan a 75 cm del centro del transductor.
- El pavimento para tráfico ligero es más flexible, por lo tanto, permite que se generen mayores deformaciones y voltajes. Al aplicar la carga centrada en el pavimento para tráfico ligero, se producen aproximadamente 6 veces más deformaciones que al aplicarla en el pavimento para tráfico pesado. Implementando la geometría final en el pavimento para tráfico ligero y aplicando la carga de forma centrada, se generan 8,33 V con el paso de vehículos ligeros y 83,32 V con el paso de vehículos pesados.

En un futuro, se pueden estudiar otros parámetros o elementos que permitan aumentar la deformación que se causa en la cerámica piezoeléctrica, por ejemplo, la colocación de caucho en las zonas laterales del transductor, de forma que permita mayores deformaciones. Por otro lado, se puede estudiar la implantación de diversos piezoeléctricos en una misma carretera o se puede estudiar el almacenaje de la energía generada para contemplar qué dispositivos puede abastecer.

Finalmente, aparte de cumplir con los objetivos definidos, se ha obtenido un gran conocimiento relacionado con la piezoelectricidad y los sistemas *energy harvesting*. Además, debido a diversos problemas ocasionados durante las simulaciones, se ha invertido mucho tiempo utilizando el software ANSYS y consecuentemente también se han obtenido conocimientos sobre su uso.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. C. Acero and J. Esteve, "Energía ambiental (energy harvesting)," *Gob. España*, pp. 1–2, 2012.
- [2] Wikipedia, "Energy Harvetsing." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [3] Anil Pandey, "Practical Microstrip and Printed Antenna Desing," *18 March*, 2019. [Online]. Available: <https://anilkrpandey.wordpress.com/2020/02/09/energy-harvesting-and-wireless-power-transfer-antenna-for-iot-applications/>. [Accessed: 13-Apr-2020].
- [4] "Del mundo de los combustibles fósiles al de los autos eléctricos." [Online]. Available: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/del-mundo-de-combustibles-fosiles-al-de-autos-electricos>. [Accessed: 04-May-2020].
- [5] A. Harb, "Energy harvesting: State-of-the-art," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2641–2654, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.06.014.
- [6] E. Sep, "Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar," p. 210, 2014.
- [7] M. T. Penella y M. Gasulla, "A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors," pp. 1–5, 2007.
- [8] M. Shirvanimoghaddam *et al.*, "Towards a Green and Self-Powered Internet of Things Using Piezoelectric Energy Harvesting," *IEEE Access*, vol. 7, no. December, pp. 94533–94556, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2928523.
- [9] idoneos, "Energy harvesting." [Online]. Available: https://www.idoneos.com/cosechamiento_de_energia/. [Accessed: 05-May-2020].
- [10] G. O. Özgen, "Piezoelectric materials and design of simple smart structures with piezoelectric materials," 2014.
- [11] "Piezoelectricidad, ¿Qué es eso?" [Online]. Available: <https://jm3studio.com/piezoelectricidad-que-es-eso/>. [Accessed: 05-May-2020].
- [12] J. J. Sun, A. Hall, I. Simoneishvilli, E. K. Akdogan, and A. Safari, *Novel piezoelectric sensors and actuators*. 2007.
- [13] APSNEWS, "The Curie Brothers Discover Piezoelectricity." [Online]. Available: <https://www.aps.org/publications/apsnews/201403/physicshistory.cfm>. [Accessed: 05-May-2020].
- [14] Wikipedia, "Gabriel Lippmann." [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Gabriel_Lippmann. [Accessed: 05-May-2020].
- [15] "Energía Piezoeléctrica." [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/bloguniversitariofisica/>. [Accessed: 06-May-2020].

- [16] "INVESTIGACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y ELECTRÓNICO DE LOS INYECTORES PIEZOELÉCTRICOS BOSCH." [Online]. Available: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14025/2/ESPEL-MAI-0615-P.pdf>. [Accessed: 06-May-2020].
- [17] "Energy Floors genera electricidad a partir de la energía de la pisada." [Online]. Available: <https://www.construible.es/2015/03/11/energy-floors-genera-electricidad-a-partir-de-la-energia-de-la-pisada>. [Accessed: 07-May-2020].
- [18] "Sustainable Dance Floor." [Online]. Available: <https://www.studioroosegaard.net/project/sustainable-dance-floor>.
- [19] "Eco-Club Wars: Dancers (Literally) Light Up Rotterdam's WATT, London's Club4Climate." [Online]. Available: <https://www.treehugger.com/culture/eco-club-wars-dancers-literally-light-up-rotterdams-watt-londons-club4climate.html>. [Accessed: 07-May-2020].
- [20] E. J. R. Company, "Demonstration Experiment of the ' Power-Generating Floor ' at Tokyo Station," *Time*, pp. 1–3, 2008, doi: <http://www.jreast.co.jp/e/development/press/20080111.pdf>.
- [21] "Energy-Generating Floors to Power Tokyo Subways." [Online]. Available: <https://inhabitat.com/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/>. [Accessed: 07-May-2020].
- [22] F. Duarte and A. Ferreira, "Energy harvesting on road pavements: State of the art," *Proc. Inst. Civ. Eng. Energy*, vol. 169, no. 2, pp. 79–90, 2016, doi: 10.1680/jener.15.00005.
- [23] A. Kokkinopoulos, G. Vokas, and P. Papageorgas, "Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators-The potential for the Attiki Odos traffic grid," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 1070–1085, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.126.
- [24] R. Calìo *et al.*, "Piezoelectric energy harvesting solutions," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, pp. 4755–4790, 2014, doi: 10.3390/s140304755.
- [25] H. Li, C. Tian, and Z. D. Deng, "Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no. 4, 2014, doi: 10.1063/1.4900845.
- [26] Z. ALAEI, "Power Enhancement in Piezoelectric Energy Harvesting," pp. 18–21, 2016.
- [27] CeramTec, "Principios de Funcionamiento Piezoeléctrico, Perovskita y Polarización." [Online]. Available: <https://www.ceramtec.es/materiales-ceramicos/piezoceramica/basicos/>. [Accessed: 14-May-2020].
- [28] M. Hurtado Prendes, "Generación de energía mediante piezoeléctricos en vías ferroviarias," p. 114, 2016.
- [29] M. C. R. Ortiz, "Estudio de la respuesta ferroelectrica en compositos La_{0,7}Sr_{0,3}MnO₃/BaTiO₃," vol. 1, no. 1, pp. 11–62, 2000, doi: 10.4067/S0071-17132000003500023.
- [30] A. do Brasil, "Documento 3 de la fase 1. Materiales piezoeléctricos. Materiales Dispositivos Piezoeléctricos: Fundamentos y Desarrollo," pp. 1–18, 2004.
- [31] L. APPC International, "Piezoelectric constants." [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>. [Accessed: 15-May-2020].

- [32] L. B. Kong, T. Li, H. H. Hng, F. Boey, T. Zhang, and S. Li, *Waste Energy Harvesting: Mechanical and Thermal Energies*, vol. 24, no. 1. 2014.
- [33] S. Saadon and O. Sidek, "A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters," *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 500–504, 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.024.
- [34] A. Townley, "VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING USING MEMS PIEZOELECTRIC GENERATORS Andrew Townley – Electrical Engineering, University of Pennsylvania Advisor: Gianluca Piazza," *Most*.
- [35] Wikipedia, "Piezoelectricity." [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>. [Accessed: 22-May-2020].
- [36] S. P. Beeby and T. O'Donnell, *Electromagnetic energy harvesting*. 2009.
- [37] H. Zhao, J. Ling, and J. Yu, "A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement," *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 120, no. 1404, pp. 317–323, 2012, doi: 10.2109/jcersj2.120.317.
- [38] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, "Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review," *Appl. Energy*, vol. 212, no. August 2017, pp. 1083–1094, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.125.
- [39] Y. Kuang, A. Daniels, and M. Zhu, "A sandwiched piezoelectric transducer with flex end-caps for energy harvesting in large force environments," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 34, 2017, doi: 10.1088/1361-6463/aa7b28.
- [40] ResearchGate, "3 Multifunctional Materials: The Basis for Adaptronics." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-moonie-transducer-20_fig11_265290649. [Accessed: 25-May-2020].
- [41] Physik Instruments, "P-876 DuraAct™ - Piezoelectric Patch Transducers," *Data Sheet*, p. 2, 2008.
- [42] "SOLIDWORKS Simulation: Get connected with Contact." [Online]. Available: <https://blogs.solidworks.com/tech/2016/11/solidworks-simulation-get-connected-contacts.html>. [Accessed: 29-May-2020].
- [43] C. Riba, *Selección de materiales en el proceso de diseño de maquinas*. 2008.
- [44] "Diagramas para el cálculo de vigas." [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/FRANKYHERNANDEZACOST/formulas-y-diagramas-para-el-ciclos-de-vigas>. [Accessed: 06-Jul-2020].
- [45] E. M. de Fomento, "Instrucción de carreteras. Norma 6.1 IC: Secciones de firme," *Norm. Instr. Construcción*, p. 41, 2003.
- [46] Zalba-Caldú, "Medida y presión de los neumáticos." [Online]. Available: <https://www.zalba-caldu.com/blog/2018/04/17/medida-y-presion-de-los-neumaticos/>. [Accessed: 12-Jul-2020].
- [47] "Pavegen." [Online]:. Available: <https://pavegen.com/>. [Accessed:07-May-2020]