

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones



### Trabajo Fin de Grado

Estudio y simulación de dispositivos para la captura de energía ambiente a pequeña escala empleado nuevos materiales piezoeléctricos.



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR

**Autor:** Jhonatan Durán Rebouca

**Tutor:** Fernando Bernabé Naranjo Vega

2023



**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones**

**Trabajo de Fin de Grado**

Estudio y simulación de dispositivos para la captura de energía ambiente a pequeña escala empleado nuevos materiales piezoeléctricos.

Autor: Jhonatan Durán Rebouca

Tutor: Fernando Naranjo

**Tribunal:**

**Presidente: Miguel González Herráez**

**Vocal 1º: Ángel Llamazares Llamazares**

**Vocal 2º: Fernando B. Naranjo Vega**

Fecha de depósito: 19 de septiembre de 2023



# Agradecimientos

A mi difunta esposa, lo que soy ahora es el  
resultado de lo que construimos juntos.

A mi tutor, por su ayuda y paciencia.



# Resumen

El presente trabajo tiene por finalidad el estudio de la aplicación de distintos materiales piezoeléctricos en un recolector de energía de una fuente vibratoria a pequeña escala. La configuración usada para el recolector es la de un cantiléver en el que además de probar diversos materiales piezoeléctricos, se prueban diversas combinaciones de sustratos.

Adicionalmente se realiza un estudio de un material de reciente investigación, el nitruro de aluminio y escandio. El estudio se centra en cómo afecta a las propiedades del cantiléver el cambio en la concentración de escandio y aluminio en la aleación.

# Abstract

The purpose of this work is to study the application of different piezoelectric materials in an energy harvester of a small-scale vibrating source. The configuration used for the collector is a cantilever in which, in addition to testing various piezoelectric materials, various combinations of substrates are tested.

In addition, a study is carried out on a recent research material, scandium aluminum nitride. The study focuses on how the change in the concentration of scandium and aluminum in the alloy affects the properties of the cantilever.

# Palabras clave

Energy harvesting, piezoelectricidad, cantiléver, aleación, escandio, nitruro de aluminio.





# Índice general

<b>Portada .....</b>	<b>i</b>
<b>Agradecimientos .....</b>	<b>v</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Palabras clave .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice general.....</b>	<b>1</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>3</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Introducción.....</b>	<b>7</b>
1.1 Planteamiento del trabajo y objetivos a conseguir. ....	9
<b>2 Fundamentación teórica .....</b>	<b>10</b>
2.1 Introducción.....	10
2.2 Materiales piezoeléctricos y sus parámetros. ....	11
2.2.1 Configuración del recolector.....	14
2.2.2 Materiales piezoeléctricos naturales. ....	18
2.2.3 Materiales piezoeléctricos sintéticos.....	19
2.3 Aplicaciones de los materiales piezoeléctricos. ....	21
2.4 Uso de materiales piezoeléctrico en la generación de electricidad .....	22
<b>3 Simulaciones con COMSOL.....</b>	<b>24</b>
3.1 Introducción.....	24

3.2 Procedimiento de las simulaciones.....	27
3.2.1 Búsqueda de la frecuencia de resonancia del material.....	27
3.2.2 Potencia de salida en función de la carga eléctrica.....	28
3.2.3 Respuesta en frecuencia para carga óptima. ....	30
3.2.4 Voltaje y potencias de salida en función de la aceleración.....	30
3.3 Simulación y resultados con los materiales PZT-5A, LiNbO <sub>3</sub> , AlN y ZnO .....	31
3.3.1 Materiales piezoeléctricos y sustratos empleados.....	31
3.3.2 Resultados de las simulaciones.....	33
3.4 Simulación y resultados con el material ScAlN .....	35
<b>4 Conclusiones.....</b>	<b>41</b>
<b>5 Presupuesto .....</b>	<b>43</b>
<b>6 Bibliografía.....</b>	<b>44</b>

# Índice de tablas

Tabla 1. Principales parámetros de los piezoeléctricos estudiados .....	33
Tabla 2. Principales parámetros de los sustratos utilizados .....	33
Tabla 3. Resultados de las simulaciones de los materiales en distintas combinaciones con los sustratos con 12 K $\Omega$ de carga .....	34
Tabla 4. Resultados de las simulaciones de los materiales en distintas combinaciones con los sustratos con la carga ideal .....	35
Tabla 5. Parámetros necesarios para la simulación en función del porcentaje de escandio presente en la aleación.....	38
Tabla 6. Resultados de las simulaciones con distinto porcentaje de escandio en la aleación de nitruro de aluminio y escandio con sustrato de acero. ....	38
Tabla 7. Costes materiales.....	43
Tabla 8. Costes profesionales.....	43
Tabla 9. Costes totales.....	43



# Índice de Figuras

Figura 1. Configuración tipo pila (stack) .....	15
Figura 2. Configuración tipo concha.....	15
Figura 3. Configuración en viga de voladizo (cantilever).....	16
Figura 4. Modo 3-1.....	17
Figura 5. Modo 3-3.....	17
Figura 6. Viga en voladizo objeto de estudio .....	25
Figura 7. Esquema de conexión. En azul el material piezoeléctrico. ....	27
Figura 8. Respuesta en frecuencia de un cantiléver con sustrato de acero y material piezoeléctrico de PZT5A.....	28
Figura 9. Barrido de cargas a frecuencia de resonancia. ....	29
Figura 10. Carga para potencia eléctrica de salida máxima. ....	29
Figura 11. Respuesta en frecuencia para carga óptima. ....	30
Figura 12. Respuesta a la aceleración. ....	31
Figura 13. Respuesta en frecuencia de la tensión del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación.....	39
Figura 14. Respuesta en frecuencia de la potencia mecánica del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación. ....	39
Figura 15. Respuesta en frecuencia de la potencia eléctrica del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación. ....	40



## 1 Introducción

El concepto de “Energy Harvesting”, en adelante EH por sus siglas en inglés, puede definirse como el proceso en el que la energía de fuentes como la radio frecuencia, la luz, los gradientes de temperatura, las vibraciones, los gradientes de salinidad, entre otras, es capturada o recolectada para obtener de esta una potencia que, aunque puede ser muy baja, es suficiente para el funcionamiento de pequeños dispositivos electrónicos o para su almacenamiento [1] [2].

Al contrario de lo que se pueda llegar a pensar, la recolecta de energía o EH no es una idea contemporánea. Como ejemplo podemos citar el efecto termoeléctrico, descubierto por el físico alemán Thomas Johann Seebeck en torno al año 1821 [3] y cuya aplicación práctica en nuestros días se ve en el termopar que entre sus varios usos está el de generar electricidad. Otros ejemplos de que EH es una idea bastante antigua son el principio de inducción electromagnética estudiada por Joseph Henry y Michael Faraday (1831) [4] o el efecto fotovoltaico descubierto por el físico francés Edmund Becquerel en 1839 [5]; mientras que el primero rige el funcionamiento de los generadores eléctricos por inducción magnética el segundo es la base del proceso por el cual una célula fotovoltaica transforma la luz solar en energía eléctrica.

El crecimiento y evolución de los recolectores o “harvesters” está permitiendo que la recolecta de energía ambiente esté tomando mayor protagonismo en la actualidad. Este crecimiento va de la mano con la continua mejora de la tecnología electrónica que está impulsando la fabricación de dispositivos con un consumo cada vez menor y con una mayor eficiencia, esto propicia que la recolecta de energía a pequeña escala sea una excelente opción para la alimentación de diversos dispositivos electrónicos como los cada vez más numerosos IoT.

Podemos definir al IoT como un ecosistema de dispositivos interconectados que intercambian datos a través de redes. Entre estos se incluyen todo tipo de dispositivos de los denominados “inteligentes” desde los más conocidos como smartphones, ordenadores, electrodomésticos inteligentes o pequeños dispositivos y sensores portátiles (*wearables*) hasta otros no tan conocidos por el público general como son los diversos sensores y controladores de uso industrial [6, 7].

Desde el primer electrodoméstico conectado a internet en 1982, pasando estos dispositivos a superar en número a la población mundial a finales de la primera década de este siglo y hasta nuestros días, el crecimiento del IoT ha sido exponencial y, además, se espera que siga creciendo. En este crecimiento jugará un papel importante la tecnología de conectividad 5G, la mejora en eficiencia y la autonomía energética [6].

Las distintas revoluciones industriales que se han vivido han supuesto cambios radicales en la forma de vida de nuestra sociedad. En esta cuarta revolución industrial que estamos viviendo, también conocida como industria 4.0, el común denominador es la digitalización [7]. Esta digitalización, además de reducir costes, trae consigo a la industria el IoT, la robótica, la interconexión de dispositivos, los sistemas ciber físicos, acceso en tiempo real a los datos e inteligencia artificial, entre otras mejoras [8, 9].

Con las distintas revoluciones industriales el operario también ha tenido que ir cambiando y adaptando su formación a la exigencia de la industria, pasando del trabajo hábil y manual con apoyo de herramientas y máquinas en la primera revolución industrial a un trabajo asistido con herramientas asistidas por ordenadores como las máquinas CNC de la segunda revolución industrial. En la tercera revolución industrial el trabajo del operario pasa a ser cooperativo con robots y máquinas controladas por ordenador. En esta cuarta revolución industrial que estamos viviendo surge el operario 4.0. Este operario realiza su trabajo ayudado por máquinas u otros dispositivos (*wearables*) que buscan una mejora de las capacidades físicas, sensoriales y cognitivas del operario [10, 11].



La sensórica inteligente es fundamental en la industria 4.0. Esta sensórica nos permite tener la capacidad de detectar, medir, analizar y procesar datos en tiempo real de fuentes muy distintas y, además, poder usarla para interconectar sistemas, máquinas, procesos y operarios. Esto supone un enorme avance en esta revolución industrial ya que permite digitalizar el mundo físico generando datos de un gran valor para su posterior análisis [7, 12].

Otro aspecto por destacar que favorece el aumento del uso de estas tecnologías es la concienciación por uso de energías renovables. La Agencia Internacional de la Energía prevé que para finales de 2026 el 95% del crecimiento de la capacidad de generación de energía mundial proceda de fuentes renovables [13]. Esto demuestra la apuesta de futuro de estas tecnologías por lo que la investigación y desarrollo de estas es de enorme interés.

### **1.1 Planteamiento del trabajo y objetivos a conseguir.**

Otra fuente de energía que puede ser recolectada es la estudiada en este trabajo, se trata de la energía obtenida de los materiales piezoeléctricos. El objetivo de este trabajo es el estudio de nuevos materiales piezoeléctricos y de sus geometrías para su posterior empleo en la captura o recolecta de energía a pequeña escala.

Este trabajo comienza con el estudio del arte actual, de las aplicaciones y de las investigaciones en curso de los materiales piezoeléctricos utilizados en la actualidad.

Entre los objetivos a conseguir destaca el determinar las prestaciones alcanzables y las aplicaciones asociadas a estos materiales. Para ello se ha empleado el programa de simulación COMSOL [14].

## 2 Fundamentación teórica

### 2.1 Introducción.

*“Los cristales que tienen uno o más ejes con extremos diferentes, es decir, los cristales hemiédricos [semisimétricos] con caras oblicuas, poseen una propiedad física particular de dar lugar a dos polos eléctricos de signos opuestos en los extremos de estos ejes cuando sufren un cambio de temperatura: Este fenómeno se conoce como piroelectricidad. Hemos encontrado un nuevo método para desarrollar electricidad polar en estos mismos cristales, que consiste en someterlos a variaciones de presión a lo largo de sus ejes hemiédricos. Jacques y Pierre Curie” [15]*

El término piezoelectricidad tiene su origen en la palabra griega *piézin* [16] que significa comprimir. Este término fue el elegido por los hermanos Curie para dar nombre al efecto que descubrieron en materiales dieléctricos cristalinos, los cuales están formados por moléculas polares cuya estructura no tiene un centro simétrico. Dicho efecto produce que los materiales antes mencionados se polaricen cuando son sometidos a una presión o tensión mecánica externa. La amplitud y frecuencia de la señal es directamente proporcional a la deformación mecánica del material piezoeléctrico [17].

Tal y como se puede leer del texto arriba citado del artículo en el que los hermanos Curie dan a conocer su descubrimiento, estos compararon el efecto piezoeléctrico con el ya conocido fenómeno de la piroelectricidad que aparece en los mismos cristales. Examinando la turmalina, la blenda de zinc, la boracita, el topacio, la calamina y el cuarzo, encontraron que, de forma general, el efecto eléctrico de la tensión mecánica es como la del calentamiento y que el de la compresión mecánica es como el enfriamiento cuando se habla de las direcciones y signos de la carga producida. Por otro lado, no se encontró una relación entre la fuerza aplicada en las deformaciones mecánicas y el calentamiento. Jacques y Pierre Curie llegaron a la conclusión que las mismas leyes que rigen la piroelectricidad son las que rigen la piezoelectricidad [17].

El efecto piezoeléctrico inverso, es decir, la deformación mecánica de un material piezoeléctrico sometido a tensión eléctrica no fue parte de la investigación de los hermanos Curie. Por intuitivo que pueda parecer en la actualidad y, a pesar, de que este efecto haya sido planteado en la piroelectricidad; no fue hasta la deducción matemática planteada por el físico luxemburgués Gabriel Lippmann que se experimentó con este efecto. Lippmann se basó para su deducción en el principio de conservación de la carga, que por entonces era una ley, argumentando que la eficiencia del trabajo mecánico de la electricidad es máxima en un ciclo reversible y que, por lo tanto, la constancia de la carga eléctrica es condición necesaria y suficiente para tal ciclo [18] [17]. Posterior a la publicación de Lippmann los hermanos Curie se apresuraron a confirmar la existencia de este efecto, y lo hicieron obteniendo, además, pruebas cuantitativas de la reversibilidad completa del efecto piezoeléctrico observado en las deformaciones electromecánicas en estos materiales.

## 2.2 Materiales piezoeléctricos y sus parámetros.

Para entender el funcionamiento de los dispositivos piezoeléctricos es necesario comprender sus propiedades elásticas y dieléctricas, además de las propiedades piezoeléctricas. Por lo general podemos decir que las deformaciones y tensiones están íntimamente relacionadas en un material eléctrico. La fuerza aplicada por unidad de superficie es lo que conoce como tensión mecánica. Esta tensión, que puede ser tanto de tracción como de compresión, produce una deformación en el material piezoeléctrico.

Según la Ley de Hooke, “las deformaciones producidas en un material elástico son proporcionales a las tensiones que las producen”.

$$T = Y \cdot \frac{dl}{l_0} \quad (1)$$

Donde  $Y$  es el módulo de Young del material y  $\frac{dl}{l_0}$  es la deformación relativa. El módulo de Young indica la elasticidad longitudinal del material, revelando de esta forma

el comportamiento del material elástico en función de la tipología de fuerza aplicada ( $T$ ) y, por lo tanto, la variación en la longitud de este, es decir, la deformación ( $s$ ).

$$Y = T \cdot s \quad (2)$$

En términos generales, la tensión mecánica que actúa sobre un cuerpo volumétrico se puede representar por una matriz simétrica de 3x3:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Siendo  $\sigma_{ij}$  la tensión que actúa sobre la cara  $i$  en la dirección  $j$ .

En los materiales piezoeléctricos las propiedades elásticas y eléctricas están interrelacionadas. Así mismo, el vector desplazamiento eléctrico  $D$  es el resultado del producto de la constante dieléctrica o permitividad  $\epsilon$  por el campo eléctrico  $E$ .

Como consecuencia de la naturaleza anisótropa de los materiales piezoeléctricos es necesario definir distintas constantes en función tanto de las direcciones en que se producen la tensión y la deformación consecuencia de esta como de los campos eléctricos generados. Lo anterior es válido para el efecto piezoeléctrico directo e inverso. Resultado de esta necesidad se define un el sistema de dos subíndices numéricos para nombrar los componentes de las magnitudes involucradas, estos subíndices indican las mencionadas direcciones, siendo el primer subíndice la dirección de las fuerzas eléctricas aplicadas o generadas y el segundo las fuerzas mecánicas aplicadas o generadas [19].

Para el estudio se usarán los números 1, 2 y 3 para referenciar ejes cartesianos  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente.

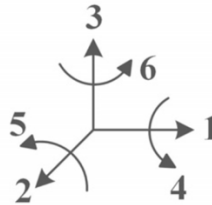
Las relaciones lineales de los diferentes parámetros de los materiales piezoeléctricos se entienden a partir de sus ecuaciones [20] [21]:

$$S_j = s_{jk}^E T_k + d_{ij} E_i \quad (4)$$

$$D_i = d_{ij} T_j + \epsilon_{jm}^T E_m \quad (5)$$

Donde:

- Los subíndices hacen referencia a las diferentes direcciones del material piezoeléctrico. Estos subíndices pueden tomar los siguientes valores  $j, k = 1, 2, \dots, 6$  y  $i, m = 1, 2, 3$



- $S$  es la deformación mecánica en una dirección, es decir, el vector de deformación medido en  $m/m$ . Dimensión  $6 \times 1$ .
- $s_{jk}^E$  es el tensor de compliancia elástica medida en un campo eléctrico constante, se trata de una matriz de coeficientes medida en  $m^2/N$ . Este parámetro relaciona la deformación en la dirección  $j$  con la tensión mecánica en la dirección  $k$ . Dimensión  $6 \times 6$ .
- $T$  es la tensión mecánica en una dirección, o lo que es lo mismo, el vector de tensión mecánica  $N/m^2$ . Dimensión  $6 \times 1$ .
- $d_{ij}$  es la matriz de constantes piezoeléctricas, esta matriz nos da la constante de deformación piezoeléctrica, esta constante se define como la relación entre la deformación libre producida y el campo eléctrico aplicado. El subíndice  $ij$  indica que la dirección  $i$  en la que se genera la carga (dirección de polarización) es consecuencia de una deformación producida en la dirección  $j$ . La unidad de medida de la constante es  $m/V$  (deformación sobre campo aplicado) o  $C/N$  (densidad de carga de cortocircuito sobre estrés aplicado).  
La constante de carga piezoeléctrica indica (en función del modo de operación que se verán en el siguiente apartado) cuan idóneo es un material piezoeléctrico para ser usado como actuador. Dimensión  $3 \times 6$ .

- $E$  es la intensidad de campo eléctrico en una dirección, el vector de campo eléctrico aplicado  $V/m$ . Dimensión  $3 \times 1$ .
- $\varepsilon_{jm}^T$  es la constante dieléctrica (permitividad) cuando sometida a una tensión mecánica constante y se mide en  $F/m$ . Este parámetro indica la carga por unidad de área en el eje  $j$  debido a un campo eléctrico en el eje  $m$ . El superíndice  $T$  se refiere a la permitividad de un campo aplicado en la dirección  $j$  cuando el material está sometido a una tensión mecánica constante [19]. Dimensión  $3 \times 3$ .
- $D$  es el vector de desplazamiento eléctrico medido en  $C/m^2$ . Dimensión  $3 \times 1$ .

La ecuación (4) es la usada en el caso de que el efecto piezoeléctrico sea inverso, es decir, cuando el dispositivo está siendo usado como un actuador. Por otra parte, la ecuación (5) en el caso de que se trate del efecto piezoeléctrico directo, cuando se trata de un sensor de deformación o, para el caso que nos ocupa, un generador de electricidad.

### 2.2.1 Configuración del recolector

Un recolector de energía proveniente de vibraciones puede tener diversas configuración o formas en función de la fuente de vibraciones que se quiere aprovechar. A continuación, se describen los más comunes para luego centrarnos en el que será objeto de este trabajo.

#### **Configuración tipo pila (stack)**

En esta configuración se colocan en capas de material piezoeléctrico apiladas con polarización opuesta entre capas, estas capas se conectan mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo. A mayor número de capas mayor será la potencia producida por la pila [22].

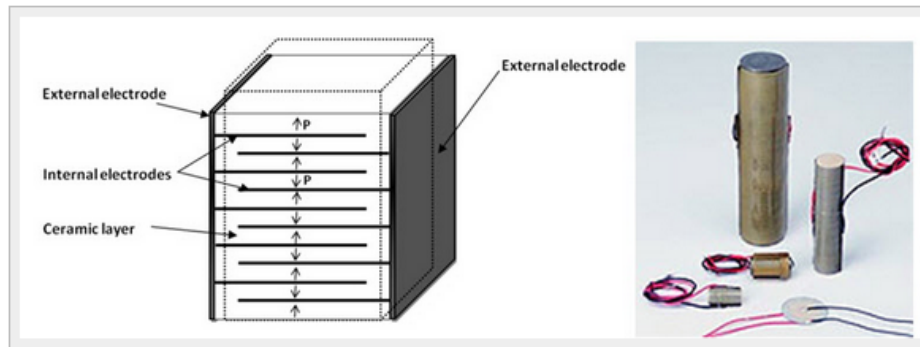


Figura 1. Configuración tipo pila (stack)

### Configuración tipo concha (Shell)

En esta configuración la lámina de material piezoeléctrico es curva, esto produce una mayor tensión si la comparamos con una lámina plana. Esta configuración busca mejorar la eficiencia y la extracción de energía del efecto piezoeléctrico [23].

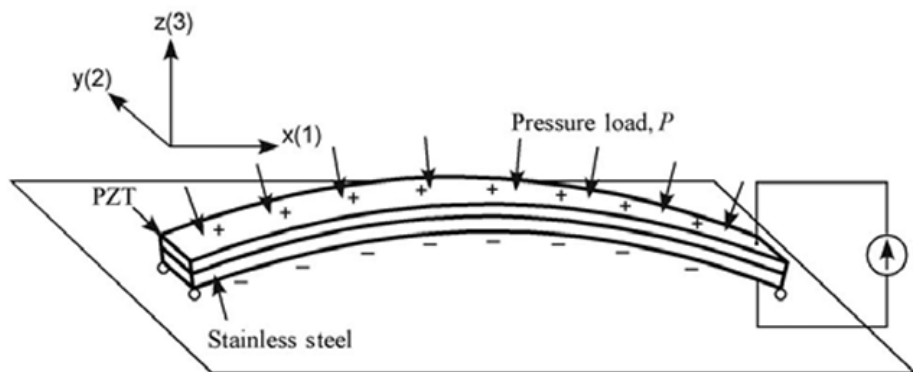


Figura 2. Configuración tipo concha.

### Configuración de viga en voladizo (Cantilever)

Esta configuración es la más común en el uso del material piezoeléctrico para la recolección de energía a partir de la vibración. Esta configuración consiste en una estructura que tiene un extremo fijo y el otro libre con una masa adicional para vibrar. La estructura la componen una o más capas de material piezoeléctrico unida a una estructura que actúa como soporte y que aumenta la sensibilidad de la estructura a la vez que reduce la fragilidad de la capa piezoeléctrica.

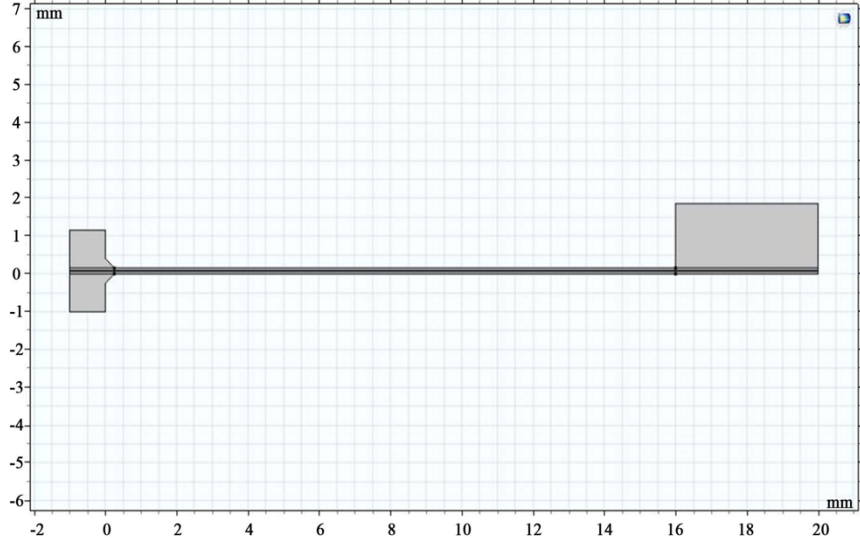


Figura 3. Configuración en viga de voladizo (cantilever)

La configuración limita los ejes en los que se deformará el material piezoeléctrico lo que a su vez simplifica las ecuaciones al reducir sus dimensiones.

Particularizando para el caso del *cantilever* con una polarización en el eje 3 en el que la deformación puede darse de forma paralela o perpendiculares a esta, las ecuaciones (4) y (5) quedan como se muestra continuación:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

De lo visto en las ecuaciones (6) y (7) y como la IEEE marca para la forma tensión-carga en esta estructura las ecuaciones (4) y (5) se ven reducidas dimensionalmente como sigue [24]:

$$S = s^E T + d_{ij} E \quad (8)$$



$$D_i = d_{ij}T + \varepsilon^T E \quad (9)$$

Entender cómo se observan las formas y direcciones en la aplicación de la fuerza es otro factor de enorme importancia para la realización de los cálculos del efecto piezoeléctrico, esto debe realizarse teniendo muy en cuenta el eje en el que el material piezoeléctrico está polarizado. Los modos de operación son diversos y son consecuencia de las distintas direcciones de aplicación de la tensión mecánica posibles y del campo eléctrico resultante como consecuencia de dicha tensión.

Los modos más comunes son el modo 3-1 y el modo 3-3, estos dos enfoques que tienen como eje de polarización el 3, son ampliamente utilizados en el diseño de recolectores piezoeléctricos.

El primero es el modo longitudinal ( $d_{31}$ ) donde la fuerza aplicada es perpendicular al eje de polarización del material, es decir, en el eje 1 (Figura 4).

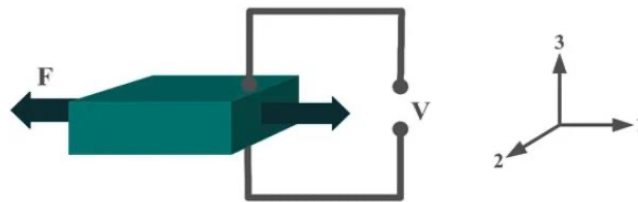


Figura 4. Modo 3-1

El más utilizado es el modo transversal ( $d_{33}$ ) donde la fuerza de tracción o compresión se produce en el eje de polarización del material piezoeléctrico, es decir, en el eje 3 (Figura 5).

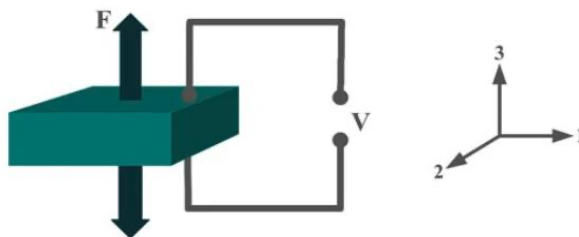


Figura 5. Modo 3-3

Por tanto, de lo anterior se deduce que los generadores piezoeléctricos que aprovechan de una tensión de compresión aplicada perpendicular a los electrodos (no confundir con el eje de polarización del material piezoeléctrico) explotan el coeficiente  $d_{33}$ , mientras que aquellos que aplican una tensión paralela a los electrodos utilizan el coeficiente  $d_{31}$ . La potencia de salida lograda en el modo de compresión se puede mejorar aumentando el espesor del elemento piezoeléctrico o utilizando apilamientos multicapa (configuración tipo stack vista antes). Sin embargo, la compresión no es un mecanismo de acoplamiento práctico para la recolección de energía de vibración en la mayoría de las aplicaciones [25]. Normalmente, en el caso de películas o elementos piezoeléctricos unidos sobre sustratos, los elementos se acoplan en dirección transversal. Una disposición de este tipo proporciona una amplificación mecánica de las tensiones aplicadas, un ejemplo de esto es la configuración en viga de voladizo usada para el estudio de materiales piezoeléctricos en este trabajo.

Desde su descubrimiento hasta nuestros días, la cantidad de materiales piezoeléctricos ha ido en constante aumento y su clasificación puede ser muy diversa. En este documento se los clasificará en dos grandes familias, los materiales piezoeléctricos naturales y los materiales piezoeléctricos sintéticos.

### **2.2.2 Materiales piezoeléctricos naturales.**

Los más conocidos y utilizados son [17] [26]:

- Cuarzo: El cuarzo es un mineral que se encuentra en la naturaleza bastante conocido por su propiedad piezoeléctrica. Se utiliza ampliamente en aplicaciones piezoeléctricas, como sensores, osciladores y dispositivos de filtrado.
- Turmalina: La turmalina es otro mineral natural que presenta propiedades piezoeléctricas. Además de sus propiedades piezoeléctricas posee propiedades piroeléctricas, es decir, tiene la capacidad de generar electricidad a partir de

los cambios de temperatura. Su aplicación es muy diversa como generador de electricidad a partir de vibraciones mecánicas.

- Sal de Rochelle: Las propiedades piezoeléctricas de este material cristalino han sido utilizadas históricamente en aplicaciones como micrófonos y altavoces.

### **2.2.3 Materiales piezoeléctricos sintéticos**

La creciente popularidad de los materiales piezoeléctricos debido al empuje de las nuevas tecnologías que maximizan la eficiencia de la electricidad generada ha propiciado la proliferación de nuevos materiales sintéticos y ha asentado la utilización de otros ya conocidos. Dada la gran cantidad de estos materiales sintetizados, se realizará una subclasificación de estos.

#### **2.2.3.1 Cerámicos**

El zirconato titanato de plomo (PZT) es una familia de materiales cerámicos piezoeléctricos que se obtienen mediante la combinación de diferentes proporciones de titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ) y zirconato de titanio ( $\text{PbZrO}_3$ ). Estas combinaciones, que pueden variar dependiendo del fabricante o las normas de cada país, dan como resultados diversos materiales tales como:

- PZT-2 está indicado para aplicaciones que requieran de constante dieléctrica baja, pero por lo demás es inferior en casi todos los aspectos a PZT-4 o PZT-5A.
- PZT-4 es recomendado para transductores acústicos de alta potencia debido a la alta resistencia que presenta y a la despolarización y bajas pérdidas dieléctricas. Su alta resistencia a la despolarización bajo estrés mecánico lo hace adecuado para su uso en transductores acústicos de inmersión profunda y como elemento activo en sistemas de generación de energía eléctrica.

- PZT-5A está recomendado para hidrófonos o aplicaciones de instrumentos debido a que opera en un amplio rango de temperatura siendo relativamente insensible a la temperatura, con alta sensibilidad y estabilidad temporal.
- PZT-5H tiene una sensibilidad y permitividad aún más altas que PZT-5A, y en la mayoría de los demás aspectos es similar a PZT-5A. Sin embargo, su punto de Curie marcadamente más bajo limita el rango de temperatura de trabajo y conduce a una estabilidad de temperatura más baja.
- PZT-8 es similar a PZT-4, pero tiene pérdidas dieléctricas y mecánicas aún más bajas bajo un accionamiento eléctrico alto. Se recomienda para aplicaciones que requieren una mayor capacidad de manejo de potencia que la adecuada para PZT-4.

Además de las citadas, existen otras variantes y composiciones de PZT disponibles en el mercado con características adaptadas específicamente para diferentes aplicaciones comerciales [18] [27] [28].

### **2.2.3.2 Polímeros**

El descubrimiento del efecto piezoeléctrico en los polímeros fue llevado a cabo por Heiji Kawai en la década de los 60. Este observó que el fluoruro de polivinilideno (PVDF) presentaba coeficientes piezoeléctricos superiores a los de cuarzo al ser traccionado y polarizado con altos campos eléctricos. De este material han ido evolucionando otros tales como [29] [30] [31]:

- PVDF-TrFE (Flururo de polivinilideno-trifluoretileno), se trata de un copolímero aleatorio conformado por monómeros de fluoruro de vinilideno y trifluoroetileno. A diferencia del PVDF, se encuentra de forma espontánea en fase ferroeléctrica.
- PVDF-CTFE (fluoruro de polivinilideno-co-clorotrifluoroetileno) Se trata de otro copolímero con excelentes cualidades para aplicaciones de baterías de

iones de litio seguras y de alta potencia. En otras aplicaciones destaca su uso en sensores de presión y actuadores.

### **2.3 Aplicaciones de los materiales piezoeléctricos.**

La primera aplicación importante en la que se materializó el uso de los materiales piezoeléctricos se dieron lugar durante la primera guerra mundial con la creación y perfeccionamiento del sonar, un detector submarino ultrasónico. Este trabajo lo llevaron a cabo P. Langevin y sus colaboradores franceses en 1917. El transductor que crearon emitía un sonido de alta frecuencia bajo el agua y medían la profundidad cronometrando el eco que retornaba.

Posteriores aplicaciones como los resonadores de cuarzo de megahercios que se desarrollaron como estabilizadores de frecuencia para osciladores de tubo de vacío o una nueva clase de métodos de prueba de materiales basados en la propagación de ondas ultrasónicas fueron resultados de ese primer éxito que supuso el sónar.

La lista de aplicaciones de los materiales piezoeléctricos clásicos es enorme, entre los más clásicos podemos citar los micrófonos, acelerómetros, transductores ultrasónicos, actuadores de elementos dobladores, captadores de fonógrafo, filtros de señal y todo tipo de sensores de vibración o presión en aplicaciones industriales.

Con el descubrimiento de ciertos materiales cerámicos con propiedades piezoeléctricas, preparados a partir de la sinterización de polvos de óxido metálico, que exhibían constantes dieléctricas hasta 100 veces más altas que los cristales se produjo un nuevo auge en la investigación y desarrollo de aplicaciones. Entre las primeras aplicaciones de materiales piezoeléctricos cerámicos destaca la mejora del sonar basada en nuevas geometrías de transductores, como esferas y cilindros; y tamaños, logrados gracias a la fundición de cerámica. Otras aplicaciones importantes fueron el cartucho fonográfico de cerámica, sistemas de encendido de motores a partir de la chispa generada

por un “píldora” cerámica o diversos hidrófonos y micrófonos de reducido tamaño y múltiples aplicaciones.

Como resultado de la constante investigación se fueron creando nuevas familias piezocerámicas. A partir de estos materiales se desarrollaron varios tipos de filtros de señal para cubrir las necesidades que surgieron en los mercados de equipos de televisión, radio y comunicaciones; también se desarrollaron nuevos encendedores piezocerámicos para su uso aparatos de gas, zumbadores de audio (alarmas de humo, generadores de tonos compatibles con TTL), transductores ultrasónicos de aire (controles remotos de televisión y alarmas de intrusión) y dispositivos de filtro SAW (Surface Acoustic Wave Filter, son dispositivos que emplean efectos de ondas acústicas de superficie para lograr el filtrado de señales de alta frecuencia). [32] [18]

#### **2.4 Uso de materiales piezoeléctrico en la generación de electricidad**

De la necesidad del ser humano por producir cada vez más energía, siendo esta producción de forma sostenible, se han impulsado la investigación y desarrollo de diversas tecnologías renovables. La energía obtenida a partir de fuentes que usan materiales piezoeléctricos para la generación de electricidad es una de estas de tecnologías que se une a las ya clásicas eólica, fotovoltaica, hidráulica, etc. La tecnología piezoeléctrica permite aprovechar, por ejemplo, las vibraciones producidas por el aire, por las olas del mar, por los motores, por vehículos en movimiento, por los pasos de los viandantes, etc.

##### **Eólica piezoeléctrica.**

La empresa Deutechno propuso en 2014 su proyecto Vortex, un aerogenerador sin palas que aprovecha la vibración ocasionada por el viento deformando un cilindro vertical semirrígido fabricado con materiales piezoeléctricos, a partir de esta vibración se produciría la energía eléctrica. [33]

Otro proyecto muy interesante para la generación eólica de electricidad mediante materiales piezoeléctricos es el planteado por BELATCHEW LABS quienes proponen revestir el edificio Söder Torn con filamentos o fibras piezoeléctricas de forma que se pueda generar la electricidad suficiente para alimentar el edificio a partir del viento. [34]

#### **Mareomotriz piezoeléctrica.**

Existen diversos planteamientos teóricos acerca de la generación de electricidad a partir de la energía potencial del oleaje marino con una estructura de boya acoplada utilizando materiales piezoeléctricos como generador. [35] [36] [37]

#### **Otros generadores piezoeléctricos**

En la generación de electricidad aprovechando el movimiento de vehículos podemos encontrar una investigación realizada en la universidad de Wisconsin en la que aprovechan el contacto de los neumáticos con la tierra para generar electricidad a partir del rozamiento entre dos materiales, es decir, el del neumático contra el suelo [38]. Otro proyecto de investigación que trabaja en la generación de electricidad cubrió la mayor parte posible del área de la superficie interna de un neumático con dobladoras PZT para producir energía a través de la deformación en la interfaz carretera-neumático conocida como parche de contacto buscando garantizar una fuente de energía confiable y continua para el vehículo en movimiento [39].

### 3 Simulaciones con COMSOL

Tal y como se comentó al principio de este trabajo, se utilizará la herramienta de simulación COMSOL Multiphysics en su versión 5.5. COMSOL Multiphysics es un software que utiliza el método de elementos finitos para la simulación y modelado de sistemas físicos, este software permite simular, analizar y optimizar una amplia gama de fenómenos físicos, como transferencia de calor, mecánica estructural, acústica, electromagnetismo, movimiento de fluidos y química, entre otros.

Gracias a esta herramienta se puede construir modelos virtuales del sistema a evaluar, definiendo las ecuaciones y condiciones físicas relevantes para, a continuación, llevar a cabo las simulaciones para comprender mejor el comportamiento del sistema y evaluar su rendimiento bajo diferentes condiciones y parámetros.

#### 3.1 Introducción

El estudio del comportamiento de distintos materiales piezoeléctricos se realizará simulando un recolector de energía piezoeléctrica con geometría en 2 dimensiones en forma de viga en voladizo como el mostrado en la figura 6. Se trata de la estructura más común y la más utilizada como recolectora piezoeléctrica. La viga en voladizo (también llamado *cantilever*) consiste en una estructura con uno de sus extremos fijo (parte izquierda en la figura 6) y el otro extremo libre para que pueda vibrar. En el extremo libre dispone de una masa de prueba que reduce un poco la frecuencia de resonancia del voladizo y aumenta la cantidad de deflexión, esto se traduce en un aumento de la tensión en el extremo fijo. [24].



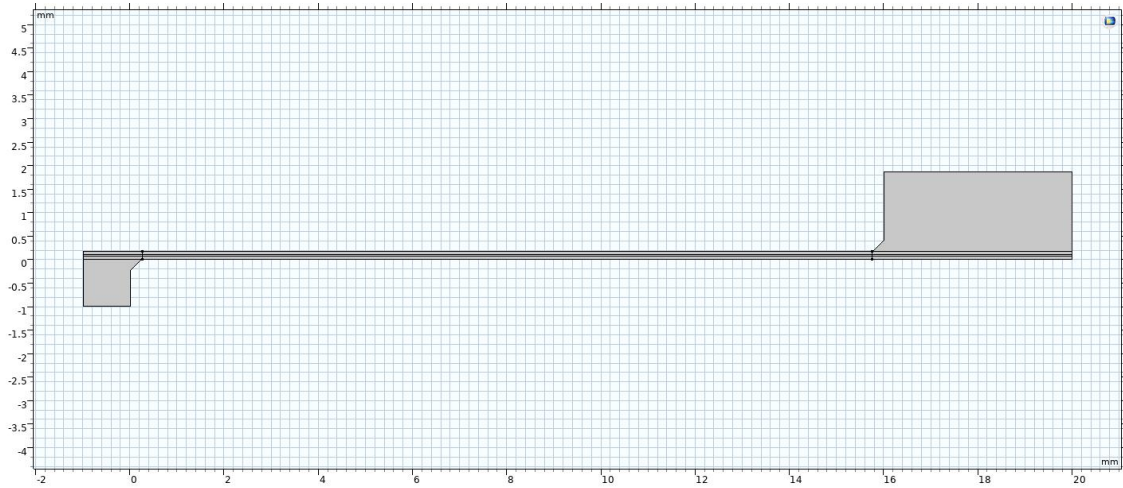


Figura 6. Viga en voladizo objeto de estudio

Para nuestro estudio, la viga tiene una longitud efectiva de 20 mm (se obvia el milímetro que está fijo) y un espesor de 0,16 mm dividido en tres capas: una superior de 0,06 mm, una central de 0,04 mm y una inferior de 0,06 mm. La capa central está formada por un metal elástico cuya función es reducir la fragilidad de las capas piezoeléctricas [24].

La viga en voladizo está construida de dos materiales: un sustrato que forma la masa de anclaje, la capa central de la viga y la masa de prueba; y el material piezoeléctrico que forma las dos capas exteriores de la viga. La masa tiene unas dimensiones de 4x1,7 mm.

El parámetro más importante de este tipo de dispositivo de recolección es la frecuencia de resonancia, la ecuación que la rige es la siguiente [24]:

$$f_n = \frac{v_n^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{D_p}{m}} \quad (10)$$

Con  $v_n = 1,875$  para el modo 3-1,  $m$  es la masa por unidad de área,  $D_p$  es el módulo de flexión que es función del módulo de Young del sustrato ( $E_s$ ) y del piezoeléctrico ( $E_p$ ); y del espesor del sustrato ( $t_s$ ) y del piezoeléctrico ( $t_p$ ); expresión resultante es la vista en la ecuación (11) [24]:

$$D_p = \frac{E_p^2 t_p^4 + E_s^2 t_s^4 + 2E_s E_p t_s t_p (2t_p^2 + 2t_s^2 + 3t_p t_s)}{12(E_p t_p + E_s t_s)} \quad (11)$$

Cabe destacar que para las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo todas las dimensiones del cantiléver, incluido los espesores, permanecen constantes. Por tanto, la variación de la frecuencia de resonancia va a depender de la variación de módulo de Young y la variación de masa (se le proporciona a COMSOL la densidad) del material.

El voladizo oscila cuando se coloca en un entorno vibrante. Las oscilaciones alcanzan el pico óptimo cuando la frecuencia de vibración del entorno coincide con la frecuencia de resonancia de la estructura en voladizo y se amortigua significativamente para todas las demás frecuencias [24].

La conexión eléctrica (figura 7) se realiza incrustando dos electrodos en las capas interiores, es decir, en las caras del material piezoeléctrico que está en contacto con el sustrato, estos electrodos constituyen el terminal de salida. En las capas exteriores (arriba y debajo de la viga) se conecta otros dos electrodos que se toman como tierra. Con esta configuración se consigue el mismo voltaje en los electrodos de salida, aunque la tensión por encima y por debajo de la capa neutra sea de signo contrario. La carga eléctrica que se empleará como punto de partida es de 12 K $\Omega$ .

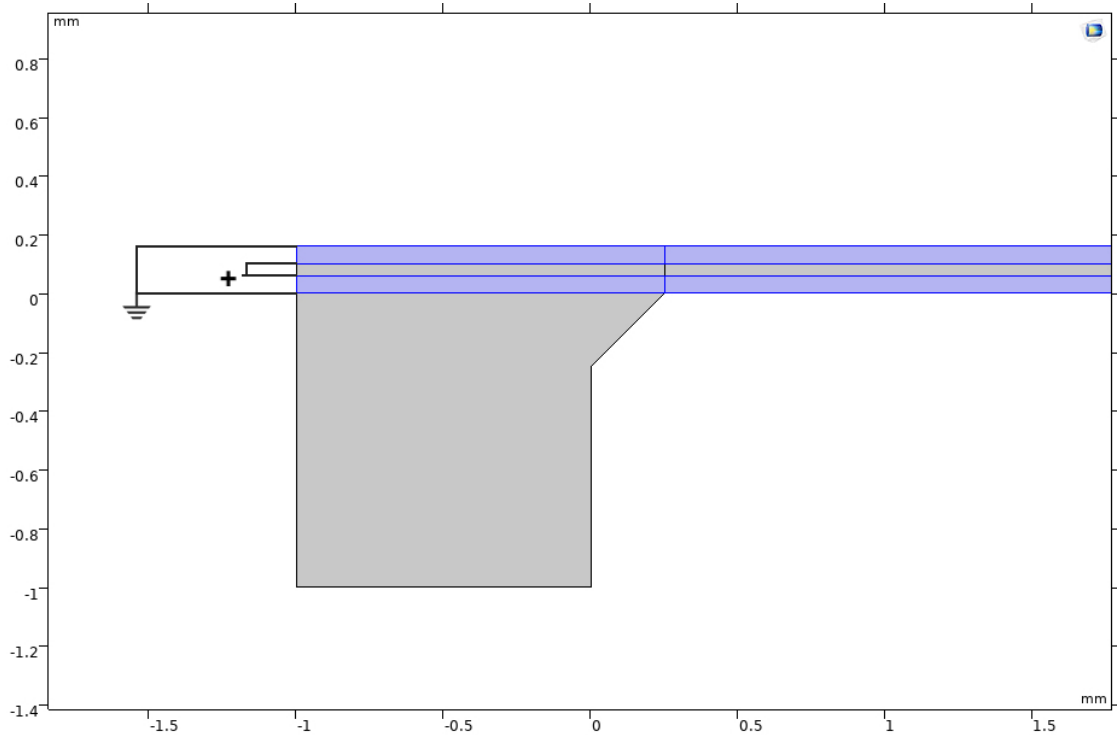


Figura 7. Esquema de conexión. En azul el material piezoeléctrico.

### 3.2 Procedimiento de las simulaciones

Construido el modelo de la figura 6, las simulaciones se realizan siguiendo los pasos que se detallan a continuación. Para esta simulación se dispone de un material como sustrato que es el acero y otro material piezoeléctrico, que para este caso se ha usado el zirconato titanato de plomo en su variante PZT-5A, en adelante se hará referencia a la combinación sustrato-piezoeléctrico usando la siguiente nomenclatura acero-PZT5A.

#### 3.2.1 Búsqueda de la frecuencia de resonancia del material.

En esta simulación se analiza la respuesta en frecuencia del recolector para el material piezoeléctrico y sustrato elegido. Se obtienen curvas de tensión de salida obtenida, potencia mecánica y potencia eléctrica. La frecuencia en la que todas las curvas alcanzan su máximo es la frecuencia de resonancia del recolector. La figura 8 muestra el resultado de la respuesta en frecuencia obtenida. La simulación se ha llevado a cabo con un paso de 0,25Hz.

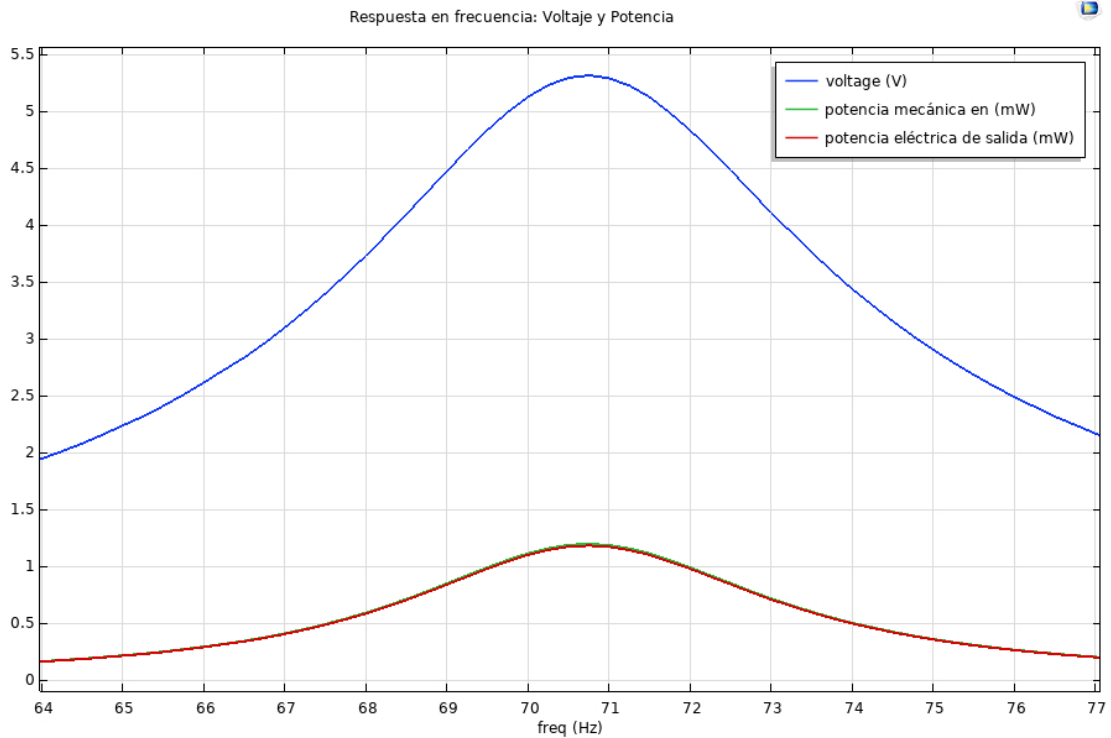


Figura 8. Respuesta en frecuencia de un cantiléver con sustrato de acero y material piezoeléctrico de PZT5A

En este caso se observa una frecuencia de resonancia del material de 70,75Hz, es importante destacar el pequeño ancho de banda de estos dispositivos recolectores de energía.

### 3.2.2 Potencia de salida en función de la carga eléctrica.

Determinada la frecuencia de resonancia del cantiléver de acero-PZT5A en 70,75Hz, se procede a realizar un estudio para encontrar la carga eléctrica óptima con la que se obtiene la mayor potencia eléctrica de salida. Para ello fijamos la frecuencia de estudio en la frecuencia de resonancia encontrada y procedemos a realizar un barrido variando la carga en pasos de  $10^{0,05} [\Omega]$  de forma que obtenemos la gráfica que se observa en la figura 8. Al igual que antes se muestran resultados para tensión, potencia mecánica y potencia eléctrica.

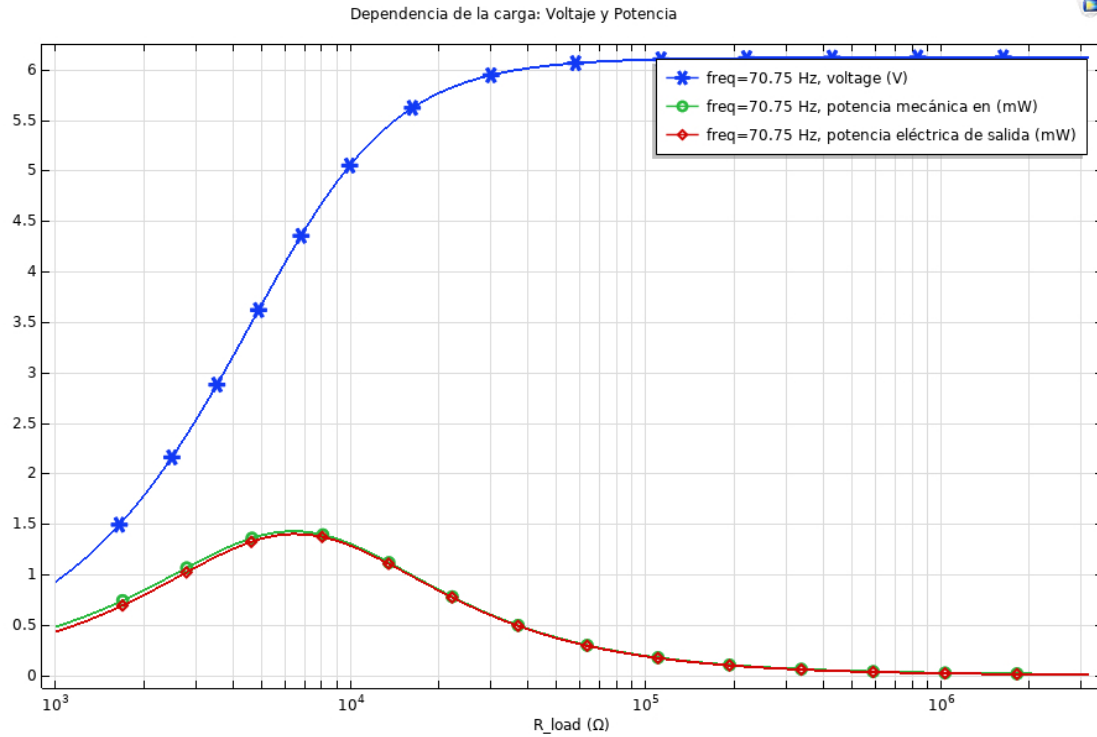


Figura 9. Barrido de cargas a frecuencia de resonancia.

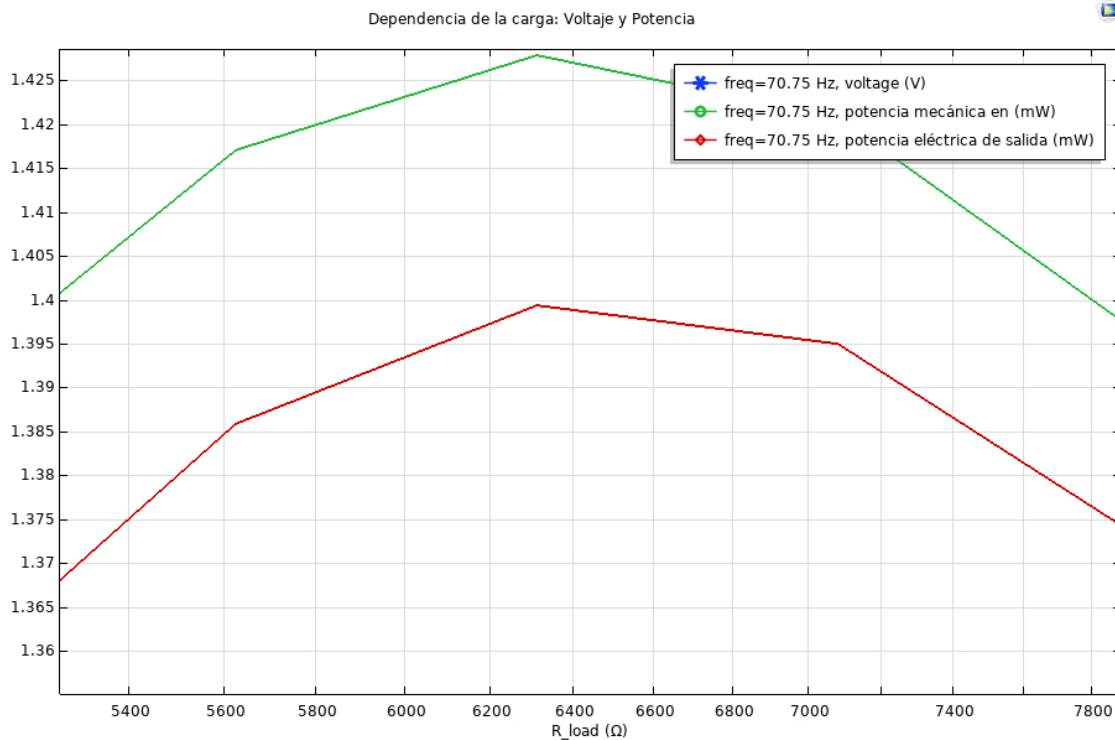


Figura 10. Carga para potencia eléctrica de salida máxima.

En la Figura 10 puede observar que en la simulación se obtiene la carga para la que el recolector tiene la mayor potencia eléctrica de salida. Ampliando la gráfica anterior

se observa que para una carga aproximada de  $6,1\text{K}\Omega$  se obtiene la mayor potencia eléctrica de salida.

### 3.2.3 Respuesta en frecuencia para carga óptima.

Conocida la carga con la que se obtiene la mayor potencia eléctrica se realiza un nuevo barrido para obtener la respuesta en frecuencia del recolector, el resultado de este barrido se muestra en la figura 11. Como se puede observar, la potencia eléctrica se han incrementado considerablemente si se comparan con las obtenidas en la figura 8. Este sería un caso ideal cuya finalidad es comprobar los resultados mostrados en el apartado anterior, puede observarse que estos resultados son coincidentes con los mostrados en la Figura 9.

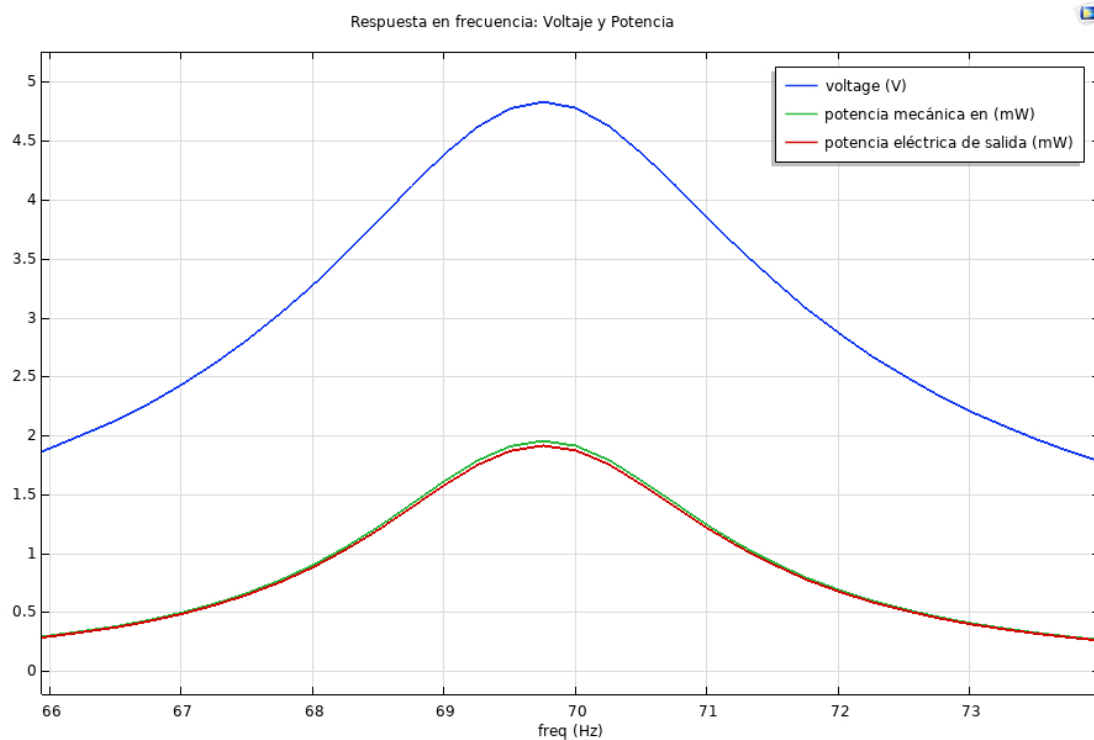


Figura 11. Respuesta en frecuencia para carga óptima.

### 3.2.4 Voltaje y potencias de salida en función de la aceleración.

Aunque es inmediato deducir que a medida que aumenta la aceleración también lo harán la tensión y las potencias de salida, se ha realizado un estudio simulando el comportamiento del dispositivo. En la figura 12 puede observarse como la tensión se

incrementa de manera lineal con aceleración mientras que la potencia mecánica y la potencia eléctrica lo hacen de manera exponencial.

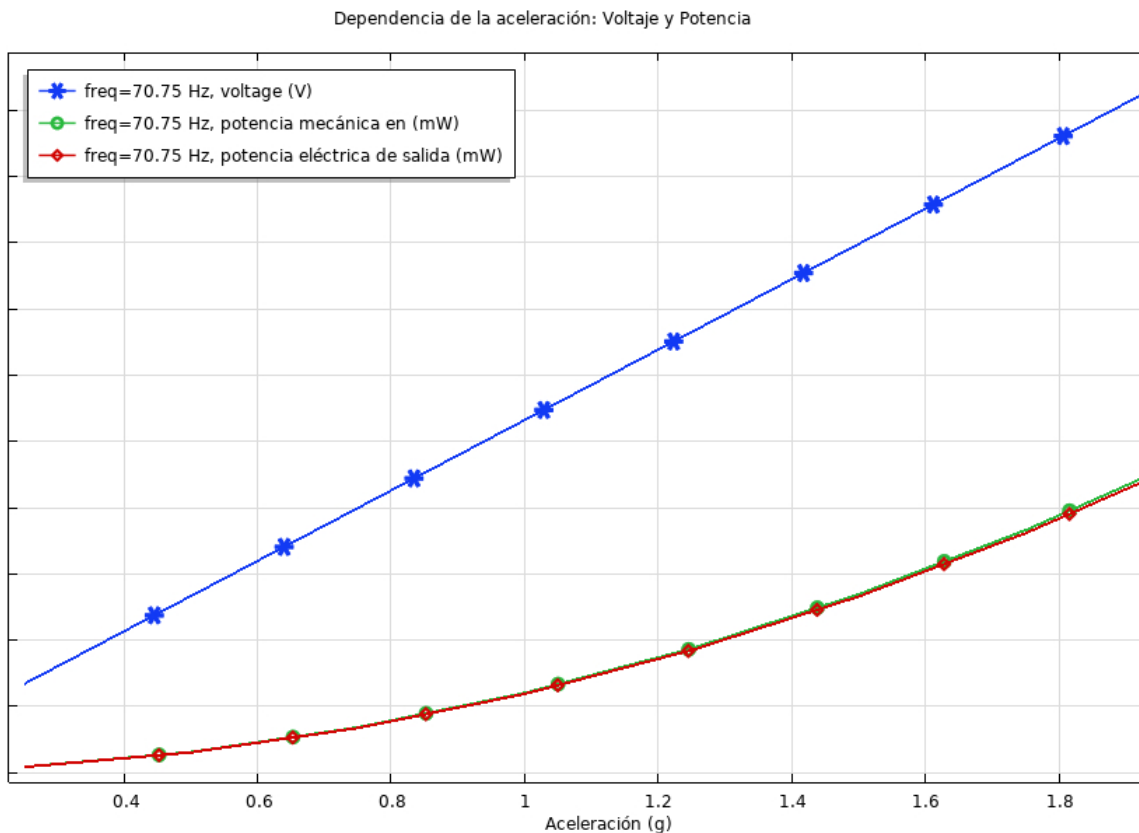


Figura 12. Respuesta a la aceleración.

Los resultados obtenidos van en línea como lo mostrado en la publicación [40] lo que demuestra que la metodología utilizada es la correcta.

### 3.3 Simulación y resultados con los materiales PZT-5A, LiNbO<sub>3</sub>, AlN y ZnO

A partir de la metodología del apartado anterior, se procede a realizar simulaciones con diversos materiales y sustratos.

#### 3.3.1 Materiales piezoeléctricos y sustratos empleados.

Como materiales piezoeléctricos se han utilizado dos de los materiales más comunes y empleados, como son el zirconato titanato de plomo en su versión PZT-5A y niobato de litio (LiNbO<sub>3</sub>) [41]; y dos materiales piezoeléctricos no ferroeléctrico que, aunque no son nuevos, son de los más usados [42] en investigaciones, estos son el nitruro de aluminio (AlN) y óxido de zinc (ZnO).

- Zirconato titanato de plomo (PZT-5A).

Tal como se comentó en el apartado el PZT-5A pertenece a la familia materiales cerámicos del zirconato titanato de plomo creado a partir de la combinación de diferentes proporciones de titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ) y zirconato de titanio ( $\text{PbZrO}_3$ ). Su uso se remonta a la década de 1940.

Entre sus principales aplicaciones destaca su uso en hidrófonos o instrumentos debido a que opera en un amplio rango de temperatura siendo relativamente insensible a la temperatura, con alta sensibilidad y estabilidad temporal [32].

- Niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ).

Se trata de un cristal sintético con diversas aplicaciones tales como guía de ondas ópticas, moduladores ópticos, diversas aplicaciones ópticas lineales y, en lo que respecta a este trabajo, diversos usos relativos a sus propiedades piezoeléctricas. Sintetizado por primera vez en 1949 por Matthias y Remeika alcanza relevancia cuando Ballman logra su crecimiento mediante la técnica de Czochalski [43].

- Nitruro de aluminio ( $\text{AlN}$ ).

El nitruro de aluminio es un cerámico sintetizado por primera vez en 1959 por pulverización catódica. Se trata de un buen conductor térmico y buen aislante eléctrico haciendo que sea muy interesante su uso en aplicaciones electrónicas. Las propiedades que presenta este material han despertado mucho interés en los últimos tiempos debido a gran variedad de aplicaciones. Su uso es muy variado, las aplicaciones más comunes son: dispositivos optoelectrónicos, sensores acústicos, sensores de gas, disipadores de temperatura, diodos led y placas de circuito impreso. [44] [45].

- Óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ).

El óxido de zinc es un viejo conocido, este material ha sido usado desde la antigüedad como pintura (conocido como “blanco de china permanente”), métodos decorativos o incluso como remedios medicinales [46].



Se trata de un material nanoestructurado de gran interés por su alto coeficiente piezoeléctrico, baja toxicidad, facilidad y bajo coste de fabricación [47].

La tabla 1 resume los parámetros de los materiales anteriores empleados en las simulaciones, estos parámetros se han obtenido de la librería de materiales de COMSOL Multiphysics.

*Tabla 1. Principales parámetros de los piezoeléctricos estudiados*

<b>Principales parámetros de los piezoeléctricos estudiados</b>				
	<b>PZT-5A</b>	<b>LiNbO3</b>	<b>AlN</b>	<b>ZnO</b>
<b>Densidad</b>	7750	5300	3300	5680
<b>S<sub>11</sub> [GPa]</b>	120	238	410	209
<b>S<sub>12</sub> [GPa]</b>	75	104	149	121
<b>S<sub>13</sub> [GPa]</b>	75	50	99	105
<b>S<sub>33</sub> [GPa]</b>	110	135	389	211
<b>S<sub>44</sub> [GPa]</b>	210	64	125	423
<b>d<sub>15</sub> [C/m<sup>2</sup>]</b>	12,29	2,76	-0,48	-0,48
<b>d<sub>31</sub> [C/m<sup>2</sup>]</b>	-5,35	-0,44	-0,58	-0,56
<b>d<sub>33</sub> [C/m<sup>2</sup>]</b>	15,78	4,33	1,55	1,32
<b>Constante dieléctrica</b>	826	32	9	10,2

Como sustratos se han usado el aluminio, el silicio y el acero. Se trata de materiales comúnmente usado en este tipo de aplicaciones de fácil uso y conocidas características [24]. En la tabla 2 se detallan los parámetros que usan las físicas de COMSOL.

*Tabla 2. Principales parámetros de los sustratos utilizados*

<b>Principales parámetros de los sustratos utilizados</b>			
	<b>Aluminio</b>	<b>Acero</b>	<b>Silicio</b>
<b>Densidad</b>	2700	7850	2329
<b>Módulo de Young</b>	70	200	170
<b>Coef. De Poisson</b>	0,33	0,3	0,28

### 3.3.2 Resultados de las simulaciones.

Se combinaron los 4 materiales piezoeléctricos con los 3 sustratos elegidos dando como resultado los valores mostrados en la tabla 3.

El conjunto de simulaciones de este apartado con 3 sustratos y 4 materiales piezoeléctrico dan un total de 12 combinaciones y, por tanto, 12 resultados que se muestran en la tabla 3. De los resultados obtenidos se puede observar la diversidad de frecuencia de resonancia que van desde los 70,75Hz de la combinación acero-PZT5A hasta los 280,50Hz de la combinación silicio-nitruro de aluminio. Aquí cabe recordar que de la expresión (11) puede deducirse que la variación depende de la combinación de los módulos de Young de ambos materiales implicados y de su masa dado que la geometría del cantiléver no varía en las distintas simulaciones.

En el apartado eléctrico se puede observarse (en la tabla 3) que los materiales piezoeléctricos combinado con el acero son los que dan mejores resultados, de estos destaca la combinación con óxido de zinc que nos da valores 13,22V y 7,28mW de potencia eléctrica de salida. El siguiente material con mejores resultados es el nitruro de aluminio en el que se obtienen valores de 9,46V y 3,73mW de potencia eléctrica de salida.

*Tabla 3. Resultados de las simulaciones de los materiales en distintas combinaciones con los sustratos con 12 K $\Omega$  de carga*

<b>Simulación con 12KOhm de carga</b>				
<b>Sustrato-Piezo</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Pot. Mec.</b>	<b>Pot. Elec.</b>
<b>Si-AIN</b>	280.50Hz	4,56V	3,96mW	0,86mW
<b>Al-AIN</b>	260.50Hz	5,43V	5,90mW	1,23mW
<b>Acero-AIN</b>	160.75Hz	9,46V	26,83mW	3,73mW
<b>Si-LiNbO3</b>	187.50Hz	1,48V	5,10mW	0,09mW
<b>Al-LiNbO3</b>	175.00Hz	1,58V	6,15mW	0,10mW
<b>Acero-LiNbO3</b>	109.75Hz	2,10V	17,34mW	0,18mW
<b>Si-ZnO</b>	173.25Hz	7,77V	6,35mW	2,51mW
<b>Al-ZnO</b>	161.75Hz	7,26V	5,73mW	2,20mW
<b>Acero-ZnO</b>	102.50Hz	13,22V	25,90mW	7,28mW
<b>Si-PZT5A</b>	119.00Hz	2,45V	0,25mW	0,25mW
<b>Al-PZT-5A</b>	110.75Hz	2,63V	0,20mW	0,29mW
<b>Acero-PZT-5A</b>	70.75Hz	5,31V	1,18mW	1,17mW

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de repetir las simulaciones de la tabla 3 cambiando la carga por el valor que mayor potencia eléctrica da, este valor

es el obtenido al realizar la simulación mostrada en el apartado 3.2.2. La frecuencia de resonancia no varía al cambiar la carga.

*Tabla 4. Resultados de las simulaciones de los materiales en distintas combinaciones con los sustratos con la carga ideal*

<b>Simulación con carga ideal</b>				
<b>Sustrato-Piezo</b>	<b>Carga</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Pot. Mec.</b>	<b>Pot. Elec.</b>
<b>Si-AlN</b>	56.2KOhm	13,42V	2,83mW	1,60mW
<b>Al-AlN</b>	50KOhm	14,17V	3,85mW	2,10mW
<b>Acero-AlN</b>	89.2KOhm	36,41V	13,66mW	7,43mW
<b>Si-LiNbO3</b>	400KOhm	31,75V	6,45mW	1,25mW
<b>Al-LiNbO3</b>	446.7KOhm	37,05V	7,82mW	1,53mW
<b>Acero-LiNbO3</b>	708KOhm	80,48V	23,37mW	4,57mW
<b>Si-ZnO</b>	24.5KOhm	11,95V	4,96mW	2,86mW
<b>Al-ZnO</b>	31.6KOhm	13,58V	4,70mW	2,92mW
<b>Acero-ZnO</b>	44.7KOhm	32,39V	19,79mW	11,73mW
<b>Si-PZT5A</b>	11.2KOhm	2,38V	0.25mW	0,25mW
<b>Al-PZT-5A</b>	10KOhm	2,46V	0,30mW	0,30mW
<b>Acero-PZT-5A</b>	6.3KOhm	5,06V	1,89mW	1,85mW

Como es inmediato deducir, se obtienen valores de tensión y potencia mayores a los obtenidos con una carga de 12K $\Omega$ . En estas nuevas condiciones la combinación del óxido de zinc con el acero sigue dando los mejores valores de potencia eléctrica de salida 11,73mW. El siguiente material con mejores resultados, al igual que antes, es el nitruro de aluminio combinado con acero con el cual se obtienen valores de 7,43mW de potencia eléctrica de salida. Los valores de tensión se explican por la alta carga requerida.

### **3.4 Simulación y resultados con el material ScAlN**

La aleación de nitruro de aluminio y escandio es un material novedoso que se suele emplear con concentraciones de escandio siempre por debajo del 15%, con resultados muy prometedores. Los campos de investigación son muy variados que van desde la aplicación en dispositivos piezoeléctricos a otras aplicaciones tales como sistemas de comunicación, sistemas optoelectrónicos o más recientemente en el estudio en la fabricación de transistores de alta movilidad de electrones [48] [49].

Dado que la aleación nitruro de aluminio y escandio es un material nuevo en su uso como piezoeléctrico no está disponible en las librerías de COMSOL por lo que debe ser creado.

En función de las físicas que se vayan a aplicar en las simulaciones COMSOL requiere de uno u otros parámetros. En el caso de los materiales piezoeléctricos son necesarios los parámetros relativos a la densidad ( $\rho$ ), matriz del tensor compliancia elástica ( $S_{ij}$ ), matriz de constantes piezoeléctricas ( $d_{ij}$ ) y la permitividad relativa o constante dieléctrica ( $\epsilon_{33}$ ).

Como ya se ha comentado antes, el ternario se construye sustituyendo átomos de aluminio por átomos de escandio, en adelante se expresará el porcentaje de esta sustitución como la  $x$  de la siguiente expresión:  $Sc_xAl_{1-x}N$ .

Cálculo de los parámetros necesarios para llevar a cabos la simulación: [48]

- Densidad. Calculada en función del porcentaje de escandio en la aleación a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = 3,806x + 3,255(1 - x) - 0,298x(1 - x) \quad (12)$$

La expresión (12) da valores en  $g/cm^3$  por lo que requiere pasarla a  $Kg/m^3$  que son las unidades que maneja COMSOL.

- Matriz del tensor compliancia elástica (13). Sus coeficientes se calculan, en función del contenido de Sc en la aleación, a partir de las expresiones (14a-14e).

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{12}^E & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}^E - S_{12}^E) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_{11} = 285,12x + 396,00(1 - x) - 238,39x(1 - x) \quad (14a)$$

$$S_{12} = 180,57x + 137,00(1 - x) + 11,23x(1 - x) \quad (14b)$$

$$S_{13} = 141,70x + 108,00(1 - x) + 51,95x(1 - x) \quad (14c)$$

$$S_{33} = -155,17x + 373,00(1 - x) + 95,49x(1 - x) \quad (14d)$$

$$S_{44} = 176,44x + 116,00(1 - x) - 158,80x(1 - x) \quad (14e)$$

Debe tenerse en cuenta que los valores resultantes están *GPa* y en COMSOL deben expresarse en notación científica.

- Matriz de constantes piezoeléctricas (15). Sus coeficientes se calculan, en función del porcentaje de escandio presente en la aleación, a partir de las expresiones (16a-16c).

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$d_{15} = 0,308x - 0,313(1 - x) - 0,528x(1 - x) \quad (16a)$$

$$d_{31} = -1,353x - 0,593(1 - x) + 0,576x(1 - x) \quad (16b)$$

$$d_{33} = 9,125x + 1,471(1 - x) - 6,625x(1 - x) \quad (16c)$$

Las unidades resultantes son  $C/m^3$ .

- Permitividad relativa o constante dieléctrica. Calculada en función del porcentaje de escandio en la aleación a partir de la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{33} = 89,93x + 10,31(1 - x) - 62,48x(1 - x) \quad (17)$$

La permitividad relativa es adimensional.

De las expresiones anteriormente descritas se calculan los parámetros necesarios para la aleación de 0% a 50% de escandio en pasos de 6,25% dando como resultados los valores de la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros necesarios para la simulación en función del porcentaje de escandio presente en la aleación.

Sc	6,25%	12,50%	18,75%	25,00%	31,25%	37,50%	43,75%	50,00%	
$\rho$	3271,977	3291,281	3312,914	3336,875	3363,164	3391,781	3422,727	3456,000	Kg/m <sup>3</sup>
$S_{11}$	375,102	356,066	338,893	323,582	310,133	298,547	288,824	280,963	GPa
$S_{12}$	140,381	143,675	146,880	149,998	153,028	155,971	158,826	161,593	GPa
$S_{13}$	113,150	117,895	122,233	126,166	129,692	132,813	135,528	137,838	GPa
$S_{33}$	345,459	317,173	288,140	258,362	227,837	196,567	164,550	131,788	GPa
$S_{44}$	110,473	106,186	103,140	101,335	100,770	101,446	103,363	106,520	GPa
$S_{66}$	117,360	106,196	96,006	86,792	78,553	71,288	64,999	59,685	GPa
$d_{15}$	-0,304	-0,291	-0,274	-0,253	-0,228	-0,199	-0,166	-0,130	C/m <sup>2</sup>
$d_{31}$	-0,607	-0,625	-0,648	-0,675	-0,707	-0,743	-0,784	-0,829	C/m <sup>2</sup>
$d_{33}$	1,561	1,703	1,897	2,142	2,440	2,789	3,189	3,642	C/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{33}$	11,625	13,429	15,720	18,500	21,768	25,524	29,768	34,500	

Obtenidos los parámetros necesarios se procede con las simulaciones necesarias.

El sustrato elegido para esta serie de simulaciones es el acero, que es el que mejores resultados ha ofrecido (tabla 3). Los resultados obtenidos son los que se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados de las simulaciones con distinto porcentaje de escandio en la aleación de nitruro de aluminio y escandio con sustrato de acero.

Simulación con sustrato de acero y carga de 12KOhm				
Piezoeléctrico	Frecuencia [Hz]	Voltaje [V]	Pot. Mec. [mW]	Pot. Elect. mW]
AlN	160,75	9,46	26,83	3,73
ScAlN 6,25%	151,00	11,13	27,92	5,16
ScAlN 12,50%	145,25	12,97	30,49	7,01
ScAlN 18,75%	139,50	11,93	20,23	5,93
ScAlN 25,00%	133,50	13,19	19,15	7,25
ScAlN 31,25%	127,00	16,37	22,91	11,17
ScAlN 37,50%	119,75	15,33	15,94	9,79
ScAlN 43,75%	111,00	15,11	12,79	9,52
ScAlN 50,00%	98,75	13,10	8,31	7,15

Adicionalmente se realizaron simulaciones paramétricas de la tabla 6 con el fin de mostrar la evolución de los distintos resultados en función del porcentaje de escandio en la aleación de nitruro de aluminio y escandio. Estas se muestran en siguientes figuras.

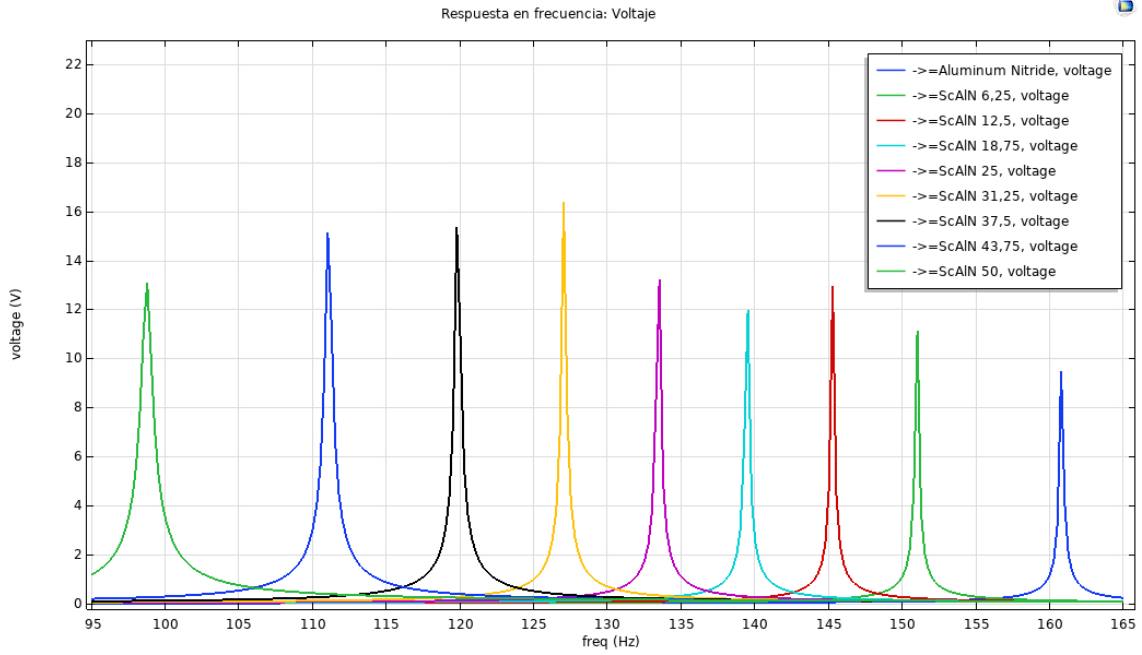


Figura 13. Respuesta en frecuencia de la tensión del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación.

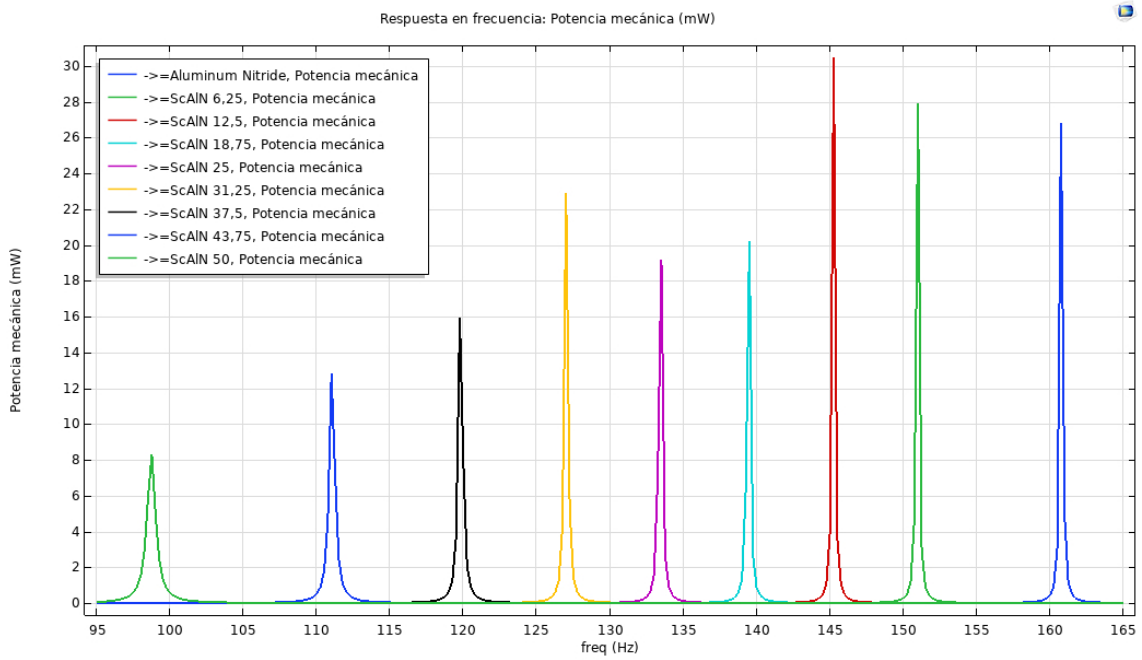


Figura 14. Respuesta en frecuencia de la potencia mecánica del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación.

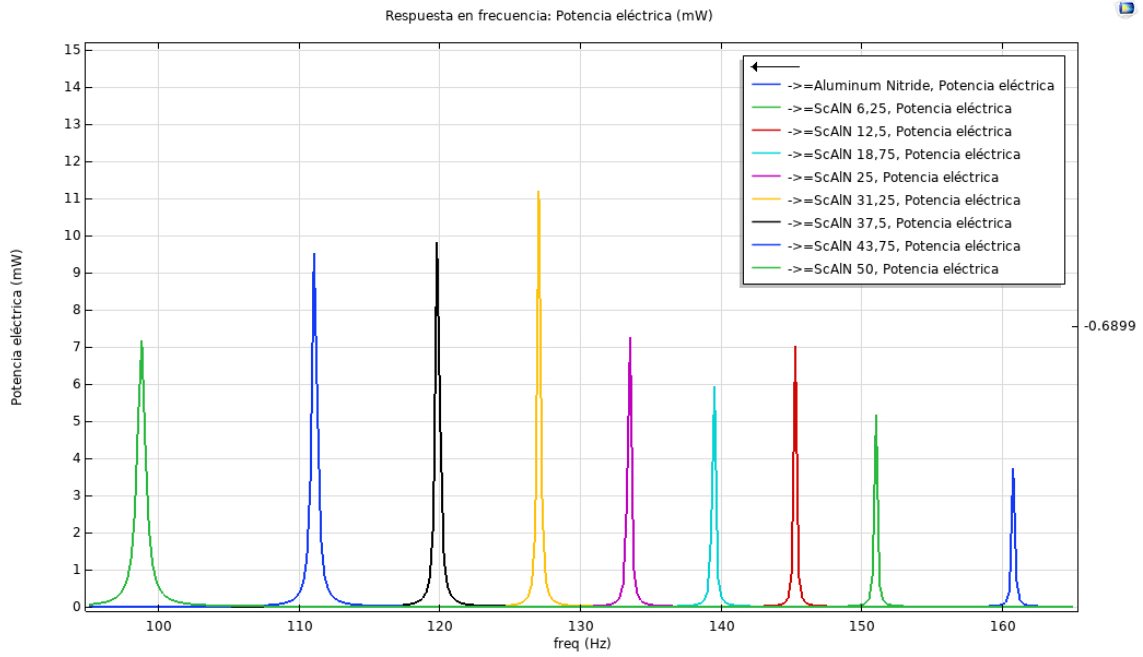


Figura 15. Respuesta en frecuencia de la potencia eléctrica del cantiléver con sustrato de acero y nitruro de aluminio con distintas proporciones de escandio en la aleación.



## 4 Conclusiones

El conjunto de simulaciones del apartado 3.3 da 12 resultados en la que se observan la diversidad de frecuencias de resonancias que van desde los 70,50Hz de la combinación acero-PZT5A hasta los 280,50Hz de la combinación silicio-nitruro de aluminio.

En cuanto a los resultados de tensión y potencia eléctrica destaca la combinación con óxido de zinc que nos da valores 13,22V y 7,28mW respectivamente. El siguiente material con mejores resultados es el nitruro de aluminio en el que se obtienen valores de 9,46V y 3,73mW de potencia eléctrica de salida.

Para las simulaciones de las aleaciones de nitruro de aluminio y escandio se observa que el material piezoeléctrico resultante en todas las proporciones de aleación presenta mejores resultados que el binario AlN. Los mejores resultados se obtienen para una proporción de 31,25% con 16,37V y 11,17mW de potencia eléctrica de salida; estos valores superan a los del óxido de zinc combinado con acero.

Como propuesta de trabajo futuro se propone la investigación sobre la “sintonización” de la frecuencia de resonancia del recolector de energía para su aplicación a una determinada frecuencia de trabajo ya que, como puede observar en las distintas figuras que muestran los resultados de las simulaciones, el ancho de banda es muy estrecho. Una vía de estudio interesante para procurar ampliar el ancho de banda es usar diversas capas de materiales piezoeléctricos con frecuencias de resonancias próximas, una opción podría ser el ScAlN ya que puede observarse en la figura 13 a 16 la variación de frecuencias con la variación presencia de escandio en la aleación, sin llegar a ser lineal, es estable. Además de las características de los materiales, algo que se ha visto en este trabajo, la geometría del cantiléver también puede suponer grandes variaciones en la frecuencia de resonancia. Otra vía de estudio relacionada es el impacto de la geometría

de los cristales en la fabricación del dispositivo, así como su aplicación en sistemas de recolección de energía reales.

Para concluir, cabe destacar el potencial que posee el sistema elegido como sistema de alimentación para sensores que puedan funcionar de forma autónoma e incluso para cargar baterías que sean fuentes de alimentación para estos.

## 5 Presupuesto

Los costes asociados a estudio llevado a cabo en este trabajo son los que se detallan en las tablas 7, 8 y 9.

*Tabla 7. Costes materiales*

<b>Objeto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
<b>Ordenador portátil</b>	1	1.250,00 €	1.250,00 €
<b>Licencia Microsoft Windows 10 Home</b>	1	130,00 €	130,00 €
<b>Licencia Microsoft Office 365</b>	1	90,00 €	90,00 €
<b>Licencia COMSOL 5.5</b>	1	3.000,00 €	3.000,00 €
<b>Material de oficina</b>	1	75,00 €	75,00 €
<b>Total</b>			<b>4.545,00 €</b>

*Tabla 8. Costes profesionales*

<b>Objeto</b>	<b>Horas</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
<b>Ingeniero Junior</b>	225	30,00 €	6.750,00 €
<b>Total</b>			<b>6.750,00 €</b>

*Tabla 9. Costes totales*

<b>Objeto</b>	<b>Precio unitario</b>
<b>Costes materiales</b>	4.545,00 €
<b>Tasas profesionales</b>	6.750,00 €
<b>Subtotal</b>	11.295,00 €
<b>IVA (21%)</b>	2.371,95 €
<b>Total</b>	<b>13.666,95 €</b>

## 6 Bibliografía

- [1] M. S. E. S. a. M. G. U. Guler, «A dual-mode passive rectifier for wide-range input power flow,» de *IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Boston, MA, USA, 2017.
- [2] M. Domínguez, «¿Qué es Energy Harvesting? Extracción de energía ambiente,» 23 febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/que-es-energy-harvesting-energia-ambiental.html>.
- [3] R. Santiago Netto, «fisicanet.com.ar,» [En línea]. Available: <https://www.fisicanet.com.ar/biografias/cientificos/s/seebeck-thomas-johann.php>. [Último acceso: 28 noviembre 2022].
- [4] C. Tomé López, «culturacientifica.com,» 14 junio 2016. [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2016/06/14/descubrimiento-la-induccion-electro-magnetica-1/>. [Último acceso: 28 noviembre 2022].
- [5] R. Williams, «Becquerel Photovoltaic Effect in Binary Compounds,» *The Journal of Chemical Physics*, pp. 1505-1514., 24 octubre 1960.
- [6] Tokio School, «tokioschool.com,» <https://www.tokioschool.com/noticias/internet-de-las-cosas-evolucion/>, 19 abril 2022. [En línea]. [Último acceso: 28 noviembre 2022].
- [7] N. Murillo, *Webinar Sensores inteligentes y concepto de Energy Harvesting*, Tecnalía, 2020.

- [8] V. Selva Belén, «Economipedia.com,» 25 septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/segunda-revolucion-industrial.html>. [Último acceso: 28 noviembre 2022].
- [9] M. Cotteleer y B. Sniderman, «Indutry 4.0,» Matthew Budman, Abrar Khan, 2017.
- [10] D. & B. P. & N. O. & S. J. & F. F.-B. Romero, «The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems,» de *10.1007/978-3-319-51133-7\_80*. , 2016.
- [11] ATIGA, «atiga.es,» Atiga Blog, 23 septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.atiga.es/el-trabajador-del-futuro-operario-4-0/>. [Último acceso: 28 noviembre 2022].
- [12] FIBRANET MX, «Linkedin,» 24 mayo 2022. [En línea]. Available: [https://es.linkedin.com/pulse/el-papel-de-los-sensores-en-la-industria-40-fibranet?trk=pulse-article\\_more-articles\\_related-content-card](https://es.linkedin.com/pulse/el-papel-de-los-sensores-en-la-industria-40-fibranet?trk=pulse-article_more-articles_related-content-card). [Último acceso: 29 noviembre 2022].
- [13] International Energy Agency, «Renewables 2021,» IEA Publications, Francia, 2021.
- [14] A. B. Naseruddin, N. Burham, A. A. Aziz y N. Khairudin, «Simulation an Electrical Performance of Aluminium Nitride using Diferente Material Properties,» de *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, 2022.

- [15] J. Curie y P. Curie, «Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées,» *Bulletin de la Société Minéralogique de France.*, p. 90–93., 22 noviembre 1880.
- [16] Real Academia Española, «Diccionario de Lengua Española RAE,» [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/piezoelectricidad>. [Último acceso: 03 05 2023].
- [17] S. Katzir, *The beginnings of piezoelectricity*, Dordrecht: Springer, 2006.
- [18] R. K. Rob Carter, «Introduction to a piezoelectric transducers,» [En línea]. Available: <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity>. [Último acceso: 03 05 2023].
- [19] S. O. Reza Mohemani y A. J. Fleming, *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, Berlin: Springer, 2006.
- [20] R. S. Dahiya y L. Lorenzelli, «SPICE Model for Lossy Piezoelectric Polymers,» *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL*, vol. 56, n° 2, pp. 387-395, 2009.
- [21] S. Kargar y G. Hao, «An Atlas of Piezoelectric Energy Harvesters in Oceanic Applications,» *Sensors*, vol. 22, n° 1949, pp. 1-30, 2022.
- [22] B. Schweber, «POWER ELECTRONICS TIPS,» 22 09 2018. [En línea]. Available: <https://www.powerelectronicstips.com/frequently-asked-questions-piezoelectric-motors-part-1-actuators-faq/>. [Último acceso: 10 07 2023].

- [23] H. S. Kim, J.-H. Kim y J. Kim, «A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 12, pp. 1129-1141, 2011.
- [24] A. M. Alsaad, A. A. Ahmad, Q. M. Al-Bataineh, N. S. Daoud1 y M. H. Khazaleh, «Design and Analysis of MEMS Based Aluminum Nitride (AlN), Lithium Niobate (LiNbO<sub>3</sub>) and Zinc Oxide (ZnO) Cantilever with Different Substrate Materials for Piezoelectric Vibration Energy Harvesters Using COMSOL Multiphysics Software,» *Open Journal of Applied Sciences*, vol. 9, pp. 181-197, 2019.
- [25] S. P. Beeby, M. J. Tudor y N. M. White, «Energy harvesting vibration sources for microsystems applications,» *Measurement Science and Technology*, n° 17, pp. 175-195, 2006.
- [26] C. a. D. M. a. U. K. a. S. M. Galassi, *Piezoelectric Materials: Advances in Science, Technology and Applications*, Springer, 2000.
- [27] H. H. A. K. D. Berlincourt, «Properties of Piezoelectricity Ceramics,» Morgan Electro ceramics.
- [28] B. Jaffe, W. R. Cook y H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press, 1971.
- [29] A. C. Lopes, P. Martins y S. Lanceros-Mendez, «Polímeros piezoelétricos,» *Gazeta de Física*, vol. 37, n° 3, pp. 24-27, 2012.
- [30] K. Heiji, «The Piezoelectricity of Poly,» *Japanese Journal of Applied Physics*, p. 8, 1969.

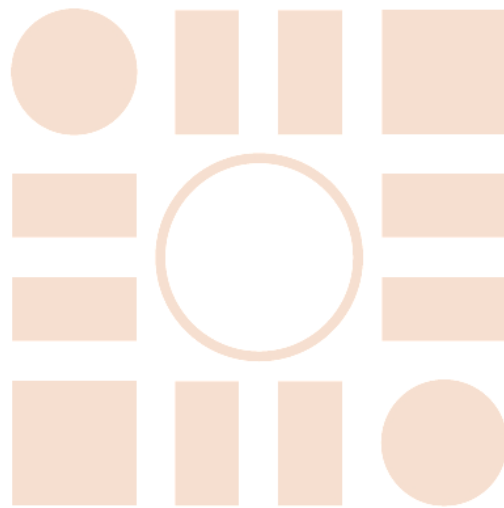
- [31] P. Bharti y A. K. Chauhan, *Piezoelectric Materials: Structure, Properties and Applications*, Springer, 2014.
- [32] PIEZO.COM, «PIEZO.COM,» [En línea]. Available: <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity>. [Último acceso: 08 06 2023].
- [33] M. Pérez, «BlogThinkBig,» 2014. [En línea]. Available: <https://blogthinkbig.com/aerogenerador-piezoelectrico>. [Último acceso: 09 06 2023].
- [34] BELATCHEW, «belatchew.com,» 2013. [En línea]. Available: <https://belatchew.com/en/projekt/strawscraper/>. [Último acceso: 09 06 2023].
- [35] N. Wu, Q. Wang y X. D. Xie, «Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure,» *Applied Ocean Research*, vol. 50, pp. 110-118, 2015.
- [36] M. Karim, I. Zobair y Z. I. Awal, «An Ocean Wave Energy Harnessing Model Using Piezo-Electric Device.,» de *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, Khulna, 2021.
- [37] M. Kiran, O. Farrok, M. Mamun, M. R. Islam y W. Xu, «Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology,» *IEEE Access*, pp. 146428 - 146449, 2020.
- [38] Y. Mao, D. Geng, E. Liang y X. Wang, «Single-electrode triboelectric nanogenerator for scavenging friction energy from rolling tires,» *Nano Energy*, vol. 15, pp. 227-234, 2015.



- [39] N. Maki y R. Pop-Iliev, «Piezoelectric power generation for sensor applications: design of a battery-less wireless tire pressure sensor,» *SPIE*, vol. 8066, p. 18, 2011.
- [40] C. Multiphysics, *Piezoelectric Energy Harvester*.
- [41] electricity-magnetism.org, «Electricidad - Magnetismo,» [En línea]. Available: <https://www.electricity-magnetism.org/es/5-tipos-de-materiales-piezoelectricos-mas-comunes/>. [Último acceso: 13 09 2023].
- [42] S. Gonzalez Castilla, *Tecnologías de fabricación de MEMS actuados piezoeléctricamente con AlN*, Madrid: Tesis Doctoral, 2009.
- [43] R. S. Weis y T. K. Gaylord, «Lithium Niobate: Summary of Physical Properties and Crystal Structure,» *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, nº 17, pp. 191-203, 1985.
- [44] J. Daza, C. Florez y G. Torrente, «A Review of the Future of Aluminum Nitride in Electronics,» *Engineering Journal ECCI*, nº 1, pp. 49-58, 2022.
- [45] L. Vergara Herrero, *PELÍCULAS DELGADAS DE NITRURO DE ALUMINIO DEPOSITADAS POR PULVERIZACIÓN Y SU APLICACIÓN A DISPOSITIVOS DE ONDAS ACÚSTICAS*, Madrid: Tesis Doctoral, 2005.
- [46] UCM Capire Grupo de Investigación, «<https://www.ucm.es/capire/>,» [En línea]. Available: [https://www.ucm.es/capire/pblancos-oxidozinc#:~:text=E1%20%C3%B3xido%20de%20zinc%20y,o%20a%20Avicena%20\(1.025%20d.C\)..](https://www.ucm.es/capire/pblancos-oxidozinc#:~:text=E1%20%C3%B3xido%20de%20zinc%20y,o%20a%20Avicena%20(1.025%20d.C)..) [Último acceso: 16 09 2023].

- [47] E. Leon Salguero, «Síntesis de nano estructuras de ZnO para su aplicación en dispositivos piezoeléctricos recolectores de energía,» de *Semana de Nanotecnología 2019*, Sonora, 2019.
- [48] O. Ambacher, B. Christian, N. Feil, D. F. Urban, C. Elässer, M. Prescher y L. Kirste, «Wurtzite ScAlN, InAlN and GaAlN crystals a comparison of structural, elastic, dielectric and piezoelectric properties,» *Journal of Applied Physics*, vol. 045102, n° 130, pp. 1-15, 2021.
- [49] Science AQ, «Science AQ,» [En línea]. Available: <http://es.scienceaq.com/Chemistry/1003085222.html>. [Último acceso: 17 09 2023].

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá