

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS
APLICADOS A LA GENERACIÓN DE
ENERGÍA. ESTUDIO EXPERIMENTAL

TRABAJO FIN DE GRADO

Julio – 2021

AUTOR: Pedro Monllor Martínez

DIRECTOR: Enrique Bronchalo Bronchalo



ÍNDICE

ÍNDICE FIGURAS.....	5
ÍNDICE TABLAS.....	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 MOTIVACIÓN	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 OBJETIVOS GENERALES.....	10
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1 FENÓMENO DE TRANSDUCCIÓN.....	11
2.2 TRANSDUCCIÓN PIEZOELECTRICA.....	13
2.2.1 HISTORIA DE LA PIEZOELECTRICIDAD.....	13
2.2.2 EFECTO PIEZOELECTRICO	15
2.2.3 MATERIALES PIEZOELECTRICOS	17
2.2.4 ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LA PIEZOELECTRICIDAD.....	19
2.2.4.1 CASO GENERAL MATERIALES ELÁSTICOS Y DIELÉCTRICOS	19
2.2.4.2 ECUACIONES PIEZOELECTRICIDAD.....	20
2.2.5 COEFICIENTES PIEZOELECTRICOS	23
2.2.5.1 CONSTANTE CARGA/DEFORMACIÓN PIEZOELECTRICA d_{ij}	23
2.2.5.2 CONSTANTE VOLTAJE PIEZOELECTRICA g_{ij}	24
2.2.5.3 COMPLIANCIA ELÁSTICA S_{ij}	25
2.2.5.4 COEFICIENTE DIELÉCTRICO ξ_{ij} (PERMITIVIDAD).....	25
2.2.5.5 COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO PIEZOELECTRICO K_{ij}	26
3. TRANSDUCTORES PIEZOELECTRICOS Y CIRCUITO ACONDICIONADOR. ASPECTOS DE DISEÑO Y APLICACIONES.....	28
3.1 MODOS DE OPERACIÓN	28
3.1.1 MODO DE OPERACIÓN d_{31}	28
3.1.2 MODO DE OPERACIÓN d_{32}	29
3.2 TIPOS DE CONFIGURACIÓN.....	29
3.2.1 VIGA EN VOLADIZO (CANTILEVER)	30
3.2.2 TIPO PILA (STACK).....	30
3.2.3 TIPO CONCHA (SHELL)	31
3.2.4 TIPO CÍMBALO (CYMBAL).....	31
3.3 CIRCUITO ACONDICIONADOR.....	32
3.3.1 RECTIFICADOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA	32
3.3.2 CONVERTIDOR DC/DC.....	33
3.3.2.1 CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)	34
3.3.2.2 CONVERTIDOR REDUCTOR (BUCK)	35
3.4 APLICACIONES DE LOS GENERADORES PIEZOELECTRICOS	36
4. DESARROLLO	38
4.1 MODELO MECÁNICO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR PIEZOELECTRICO	38
4.2 TRANSDUCTOR PB4NB2 DE THORLABS	39
4.2.1 ESQUEMA DEL TRANSDUCTOR ELECTROMECAÁNICO	40
4.2.2 ECUACIONES DE TRANSDUCCIÓN (SALIDA SIN CARGA):	41
4.2.3 RESONANCIAS	41
4.3 CARACTERIZACIÓN TRANSDUCTOR PB4NB2S	42
4.3.1 MEDIDAS COMO TRANSDUCTOR ELECTROMECAÁNICO.....	42
4.3.2 MEDIDAS COMO TRANSDUCTOR MECANOELÉCTRICO.....	53
4.4 CIRCUITO ACONDICIONADOR.....	59

4.5	MEDIDAS COMO GENERADOR.....	62
5.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	71
6.	ANEXOS	72
7.	BIBLIOGRAFIA	77



Índice Figuras

Figura 1: kWh / año. Consumo energético per cápita

Figura 2. Densidad de potencia en función de la tensión en distintos métodos de obtención de energía.

Figura 3. Evolución publicaciones científicas sobre piezoelectricidad (últimos 30 años).

Figura 4. Monocristal

Figura 5. Policristal

Figura 6. a) Polarizaciones. b) Polaridad final

Figura 7. Proceso de polarización de una cerámica piezoeléctrica

Figura 8. Ejes cartesianos

Figura 9. Disposición de un transductor PE para medir d_{31}

Figura 10. Deposición de carga en un transductor piezoeléctrico: se aplica una fuerza igual, pero opuesta, F

Figura 11. Fuerza aplicada en piezoeléctrico induce carga eléctrica

Figura 12. Modo operación d31

Figura 13. Modo operación d32

Figura 14. Configuración tipo viga en voladizo (cantiléver)

Figura 15. Configuración tipo pila (stack)

Figura 16. Configuración tipo concha

Figura 17. Configuración tipo címbalo

Figura 18. Rectificador monofásico de onda completa

Figura 19. Convertidor elevador Boost con interruptor cerrado

Figura 20. Convertidor elevador Boost con interruptor abierto

Figura 21. Convertidor reductor Buck con interruptor cerrado

Figura 22. Convertidor reductor Buck con interruptor abierto

Figura 23. Modelo equivalente mecánico de un generador piezoeléctrico

Figura 24. Modelo eléctrico y electromecánico del equivalente mecánico de un generador piezoeléctrico.

Figura 25. Modelo electromecánico equivalente para un generador piezoeléctrico.

Figura 26. Transductor PB4NB2 de ThorLabs

Figura 27. Esquema transductor electromecánico

Figura 28. Área activa y disposición electrodos

Figura 29. a) Conexión para desplazamiento a un lado

Figura 29. b) Conexión desplazamiento lado contrario

Figura 30. Relación tensión DC entrada / desplazamiento obtenido

Figura 31. Conexión electrodos para desplazamiento completo

Figura 32. Primer circuito diseñado

Figura 33. Resultado simulación primer circuito diseñado

Figura 34. Segundo circuito diseñado

Figura 35. Resultado simulación segundo circuito diseñado

Figura 36. Circuito final con AO

Figura 37. Imagen del perfil del piezo sin voltaje AC

Figura 38. Imagen del piezo en vibración a 75Hz

Figura 39. Imagen del piezo en vibración a 125Hz

Figura 40. Imagen del piezo en vibración a 200Hz

Figura 41. Desplazamiento del sensor piezoeléctrico en función de la frecuencia de trabajo.

Figura 42. Comparación centro disco con centro del motor DC

Figura 43. Función senoidal del desplazamiento del cantiléver (azul) y de una función senoidal normal de la misma amplitud y frecuencia.

Figura 44. Vista perfil montaje motor DC, disco excéntrico y piezoeléctrico con extensión.

Figura 45. Vista alzado montaje motor DC, disco excéntrico y piezoeléctrico con extensión

Figura 46. Relación tensión-frecuencia Motor DC con y sin carga

Figura 47. Relación tensión de salida respecto tensión entrada

Figura 48. Configuración pines LTC3588-1

Figura 49. Esquemático LTC3588-1

Figura 50. Tensión de salida según tensión de entrada

Figura 51. Diagrama de bloques interno

Figura 52. Diseño PCB con software Easy Eda.

Figura 53. Placa PCB impresa con los componentes soldados

Figura 54. Salida V_{OUT} a 1.8 V.

Figura 55. Disco cerámico piezoeléctrico.

Figura 56. Dimensiones disco piezoeléctrico 7BB-41-2L0

Figura 57. Montaje disco cerámico con motor DC.

Figura 58. Tensión obtenida a través de la excitación del motor DC/DC

Figura 59. Tensión obtenida a través de pulsaciones con la mano

Figura 60. Circuito acondicionador activado

Figura 61. Activación del led

Figura 62. Leve caída de tensión a través de la carga.

Figura 63. Medida en abierto

Figura 64. Medida con carga de 14,7 k Ω

Figura 65. No activación del circuito acondicionador.



Índice Tablas

Tabla 1. Comparación de cerámicas en función de sus constantes.

Tabla 2. Desplazamiento (μm) del piezo respecto a la tensión de entrada

Tabla 3. Conexión electrodos del piezo para polarización bipolar o diferencial.

Tabla 4. Desplazamiento (μm) del piezo respecto a la tensión de entrada respecto cables rojo y blanco.

Tabla 5. Posición y desplazamiento del piezoeléctrico según tensiones de entrada en cables rojo y blanco.

Tabla 6. Relación tensión/frecuencia del motor DC sin carga

Tabla 7. Datos obtenidos a la salida del piezo respecto a la vibración generada por el motor DC.

Tabla 8. Salida V_{OUT} según conexiones D_0 y D_1



1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En nuestro día a día, la electricidad se ha convertido un elemento imprescindible para nuestras vidas, pudiéndola disfrutar en nuestras casas o prácticamente allá donde vayamos. Para poder generarla, se utilizan centrales eléctricas, que transforma una forma de energía (térmica, nuclear, etc...) en electricidad a gran escala, para posteriormente transportarla hasta el consumidor. Las fuentes de energía son muy diversas, y algunas de ellas son limitadas (como el petróleo o el carbón), otras intermitentes (como la solar, la eólica) y otras son contaminantes con el medio ambiente (como el gas, carbón y el petróleo).

En las últimas décadas, el consumo ha aumentado más que en toda su historia. Por ejemplo, el consumo español medio en 2014 fue mas de 10 veces superior al de 1960 [1]. Y aunque parezca que la tendencia se ha estabilizado, la tendencia mundial es de un aumento constante debido a la nueva incorporación de los países en vía de desarrollo, como se puede observar en la Figura 1.

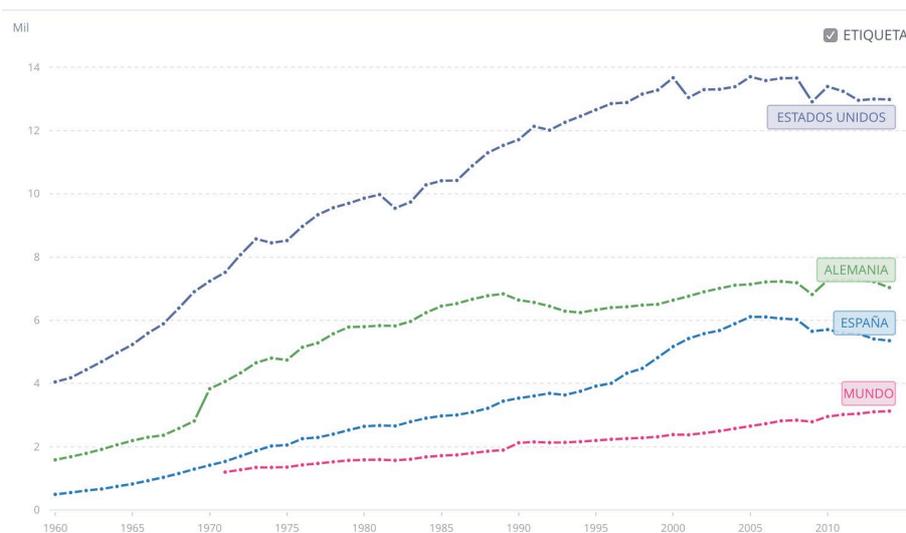


Figura 1: kWh / año. Consumo energético per cápita [1].

Para evitar seguir usando fuentes contaminantes o que generen efecto invernadero, se están investigando dispositivos que serían capaces de recolectar energía de nuestro entorno y convertirla en energía eléctrica capaz de alimentar dispositivos de bajo consumo.

Concretamente, la captación de energía a partir de las fuentes mecánicas ha sido uno de los campos que más interés e investigación ha generado. Usando el fenómeno de la piezoelectricidad, se puede diseñar un circuito acondicionador para que la vibración detectada por un transductor piezoeléctrico sea eléctricamente aprovechable.

Aunque existan métodos más consolidados y rentables, la continua investigación en el sector es fundamental para generar un mayor conocimiento y para su posible futura implementación a corto plazo de manera viable.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales de este trabajo de fin de grado serán analizar el fenómeno de transducción piezoeléctrica, describir los distintos tipos de transductores y realizar una descripción histórica de la piezoelectricidad. De forma general, se estudiará el transductor piezoeléctrico, del cual se describirán las ecuaciones constitutivas, los distintos tipos de materiales donde aparece este fenómeno, se describirán las diferentes constantes que componen las ecuaciones y las distintas aplicaciones que puede tener, así como los componentes que constan en el circuito acondicionador.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos que se pretenden conseguir en este proyecto son convertir energía mecánica en energía eléctrica de forma experimental en función de la frecuencia de vibración, usando para ello un transductor piezoeléctrico y un circuito acondicionador comerciales.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 FENÓMENO DE TRANSDUCCIÓN

La herramienta que vamos a utilizar para captar la energía mecánica y convertirla en energía eléctrica es el transductor. Un transductor es un dispositivo que se utiliza para convertir una forma de energía en otra, o, en otras palabras, es un dispositivo que puede generar variaciones de una propiedad física a partir de variaciones de otra propiedad física. La propiedad física medida puede ser mecánica, química, óptica, térmica, eléctrica, etc...

TIPO ENERGÍA → TRANSDUCTOR → OTRO TIPO DE ENERGÍA

En nuestra vida cotidiana nos podemos encontrar con varios ejemplos de transductores, como por ejemplo en los teléfonos móviles. El micrófono es un transductor que convierte la energía acústica en eléctrica o el altavoz que hace el proceso inverso, o una bombilla fluorescente, que transforma la energía eléctrica en energía luminosa.

Los transductores se clasifican según los siguientes criterios:

- Aplicación
- Método de conversión de la energía
- Naturaleza de la señal

Clasificación de los transductores según las magnitudes físicas involucradas:

- Transductores eléctricos: transforman una magnitud eléctrica en otra magnitud eléctrica (voltaje, corriente, frecuencia).
- Transductores no-eléctricos: detector (sensor). A la salida se obtiene una magnitud eléctrica correspondiente a la magnitud física detectada en la entrada.
- Transductores de desplazamiento: capacitivos, de oscilación, fotoeléctrico, piezoeléctrico.
- Transductores optoelectrónicos: convierte energía luminosa en energía eléctrica: célula fotovoltaica, célula solar...

Clasificación transductores según su alimentación:

- Transductores activos: estos transductores no necesitan ninguna fuente externa de potencia para su funcionamiento. Estos transductores son dispositivos autogeneradores que operan bajo el principio de conversión de energía. A la salida del transductor obtenemos una señal eléctrica equivalente a la detectada a la entrada del transductor. Como ejemplo de estos transductores, tenemos los siguientes:
 - Fotovoltaico
 - Termoeléctrico
 - Electromagnético
 - Químico
 - Piezoeléctrico
- Transductores pasivos: estos transductores necesitan una fuente externa de energía para su funcionamiento. No son autogeneradores. Se utiliza una fuente de alimentación CC o un generador de frecuencia de audio como fuente de alimentación externa. Estos transductores producen la señal de salida en forma de variación en la resistencia, capacitancia, inductancia o algún otro parámetro eléctrico en respuesta a la cantidad a medir.

Características de un transductor:

- Linealidad: relación funcional entre entrada y salida.
- Robustez: capacidad de soportar medidas de sobrecarga y protección.
- Repetitividad: capacidad de producir la misma salida para la misma entrada en diferentes momentos y entornos.
- Estabilidad y confiabilidad: la influencia de la temperatura y otras condiciones ambientales en la salida debe ser lo menor posible.
- Buena respuesta dinámica: capacidad de cambiar la salida rápidamente ante una variación rápida en la entrada.
- Buenas características mecánicas: capacidad para resistir la deformación y el deterioro del rendimiento causado por diversas tensiones mecánicas.

Como ya se ha comentado, se utilizará un transductor piezoeléctrico para nuestro proyecto. A continuación, se estudiará el efecto piezoeléctrico, así como los distintos materiales y las ecuaciones características de la piezoelectricidad. En la Figura 3 podemos ver la relación de densidad de potencia en función de la tensión de distintos métodos de obtención de energía.

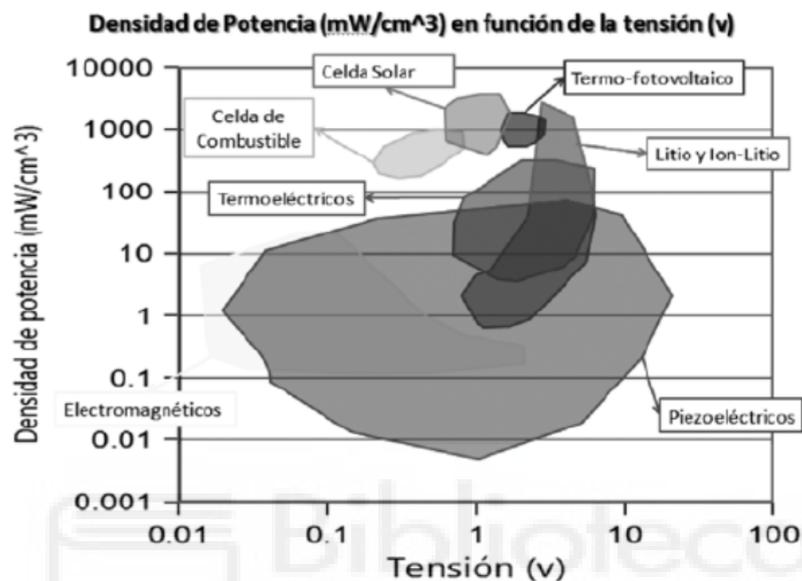


Figura 2. Densidad de potencia en función de la tensión en distintos métodos de obtención de energía.

2.2 TRANSDUCCIÓN PIEZOELÉCTRICA

Los transductores piezoeléctricos funcionan gracias al fenómeno de la piezoelectricidad. Este fenómeno consiste en la propiedad de acumular cargas en caso de tensión mecánica (efecto directo) y de deformación en caso de que se aplique una señal eléctrica entre sus electrodos (efecto inverso)

2.2.1 HISTORIA DE LA PIEZOELECTRICIDAD

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por Jacques y Pierre Curie. Ambos descubrieron que ciertos cristales se polarizaban eléctricamente al aplicarles una tensión mecánica y que esta polarización era proporcional a la tensión aplicada (efecto piezoeléctrico directo). Los hermanos Curie catalogaron una serie de cristales como la turmalina, cuarzo, topacio, sal de Rochelle entre otros, que mostraban cargas superficiales cuando estaban sometidas a tensiones mecánicas. [2]

El efecto piezoeléctrico inverso (generación de tensión mecánica a partir de un estímulo eléctrico) es una propiedad que dedujo en 1881 Gabriel Lippmann a partir de los principios fundamentales de la termodinámica. Los hermanos Curie confirmaron experimentalmente el efecto inverso después del trabajo de Lippmann. [2]

El descubrimiento de la piezoelectricidad generó un interés significativo dentro de la comunidad científica europea. Antes de la Primera Guerra Mundial se estudiaron temas como el intercambio reversible de energía eléctrica y mecánica, la naturaleza asimétrica de los cristales piezoeléctricos y el uso de la termodinámica para describir diversos aspectos de la piezoelectricidad. La primera aplicación seria para materiales piezoeléctricos apareció durante la Primera Guerra Mundial. Este trabajo se atribuye a Paul Langevin y sus colaboradores en Francia, quienes construyeron un detector ultrasónico de submarinos. El transductor estaba hecho de un mosaico de finos cristales de cuarzo pegados entre dos placas de acero. El dispositivo se utilizó para transmitir una señal de alta frecuencia al agua y medir la profundidad sincronizando el eco del retorno. Su invención no se perfeccionó hasta el final de la guerra. [2]

Después de su uso exitoso en transductores de sónar, se emplearon cristales piezoeléctricos en muchas aplicaciones. Se utilizaron cristales de cuarzo en el desarrollo de estabilizadores de frecuencia para osciladores de tubo de vacío o se usaron transductores ultrasónicos fabricados a partir de cristales piezoeléctricos para medir las propiedades del cristal. Durante este periodo también se desarrollaron muchas de las aplicaciones piezoeléctricas con las que estamos familiarizados como micrófonos, acelerómetros, transductores ultrasónicos... aunque los materiales disponibles limitaban mucho la capacidad de rendimiento de los dispositivos.

El desarrollo de materiales piezocerámicos durante y después de la Segunda Guerra Mundial impulsó este campo. Se realizaron importantes investigaciones en los EE. UU. y otros países como Japón o la antigua Unión Soviética, cuyo objetivo era el desarrollo de materiales con constantes dieléctricas muy altas para la construcción de condensadores. Como resultado de estas investigaciones, se descubrieron los materiales piezocerámicos. También hubo importantes avances dentro de la familia del titanato de bario o el desarrollo de una base teórica para conseguir las propiedades deseadas (coeficiente de acoplamiento piezoeléctrico, constante dieléctrica...). Gracias a estos

avances se empezaron a adaptar los materiales a la aplicación a realizar y no al revés, como se venía haciendo desde 1881.

En el presente, se puede comprobar por el número de nuevas publicaciones científicas (figura 3), que se sigue investigando y desarrollando aplicaciones piezoeléctricas [3].



Figura 3. Evolución publicaciones científicas sobre piezoelectricidad (últimos 30 años).

2.2.2 EFECTO PIEZOELÉCTRICO

El efecto piezoeléctrico convierte la tensión mecánica en corriente eléctrica o voltaje. Se basa en la estructura fundamental de una red cristalina. Ciertas estructuras cristalinas tienen un equilibrio de carga con polarización negativa y positiva, que se neutraliza a lo largo de un eje polar. Cuando este equilibrio de carga se ve perturbado por una tensión externa en la red cristalina, la energía es transferida por los portadores de carga eléctrica creando una corriente en el cristal. Con el efecto piezoeléctrico inverso, una entrada de carga externa creará un desequilibrio en el estado de carga neutra que causa tensión mecánica.[4]

La conexión entre la piezoelectricidad y la simetría de los cristales está estrechamente establecida. El efecto piezoeléctrico se observa en cristales sin centro de simetría, y la relación puede explicarse con estructuras monocristalinas y policristalinas.

En un monocristal (figura 4), los ejes polares de todos los portadores de carga exhiben características direccionales unidireccionales. Estos cristales muestran simetría, donde

los ejes polares a lo largo del cristal se encuentran unidireccionales incluso si se dividen en pedazos.

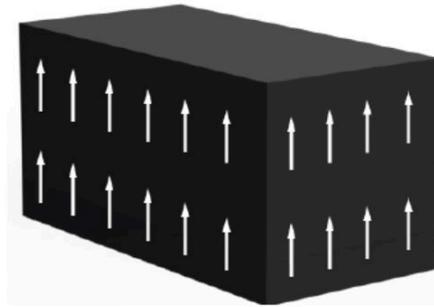


Figura 4. Monocristal [4]

En cambio, un policristal (Figura 5) se caracteriza por tener diferentes regiones con diferentes ejes polares. Es isótropo porque no hay un plano que permita cortar el cristal dejando las dos piezas restantes con los mismos ejes polares resultantes.



Figura 5. Policristal [4]

Para que el material policristalino presente un efecto piezoeléctrico significativo, se le aplica un campo eléctrico intenso y se calienta hasta la temperatura de Curie. El calor permite que las moléculas se muevan más libremente y el campo eléctrico obliga a los dipolos a reorganizarse de acuerdo con el campo externo (Figura 6). Después, el material se enfría gradualmente, manteniendo el campo externo, de forma que los dipolos se mantienen orientados. Finalmente, se suprime el campo y el material queda polarizado a temperatura ambiente. En caso de superar la temperatura de Curie, el material se despolariza y deja de servir como transductor de energía eléctrica en mecánica o viceversa. En cerámicas piezoeléctricas, los valores oscilan entre 150° y 350°.

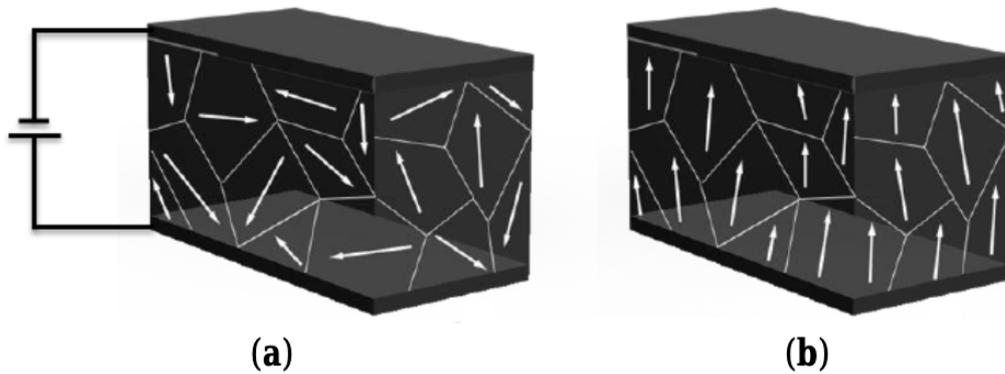


Figura 6. a) Polarizaciones iniciales con direcciones aleatorias. b) Polaridad final

Como resultado, el material posee un efecto piezoeléctrico: entre los electrodos aparece una tensión de la misma polaridad que la tensión de polarización cuando se comprime el material, y la polaridad opuesta aparece cuando se estira. La deformación del material tiene lugar cuando se aplica una diferencia de voltaje, y si se aplica una señal alterna, el material vibrará a la misma frecuencia que la señal [4-6].

2.2.3 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Existen diferentes tipos de materiales piezoeléctricos que abarcan desde los piezoeléctricos naturales, cuyas propiedades son inherentes al propio material, hasta diferentes tipos de piezoeléctricos artificiales que adquieren sus propiedades mediante tratamientos diseñados para este fin, como son las cerámicas y polímeros piezoeléctricos. A continuación, se explican los principales:

- Piezoeléctricos naturales: Fueron los primeros descubiertos y se encuentran en la naturaleza, por ejemplo: el cuarzo o la turmalina. Sus propiedades son modestas y actualmente tienen muy poca relevancia a nivel práctico, ya que han sido sustituidos por materiales de diseño con mejores propiedades. Aunque se siguen utilizando en algunas áreas puntuales, tales como ámbitos relacionados con patrones de tiempo como el reloj de cuarzo o filtros de banda muy estrecha entre otros [8] [9].
- Cerámicas piezoeléctricas: Se trata de los piezoeléctricos más utilizados en la actualidad debido a su relativa facilidad de fabricación, la posibilidad de diseñar la forma del piezoeléctrico, así como la capacidad de elegir sus propiedades en función de las proporciones de los materiales utilizados [8].

Para su fabricación, es necesario un proceso de polarización como el descrito en el apartado anterior. La siguiente imagen muestra lo explicado anteriormente.

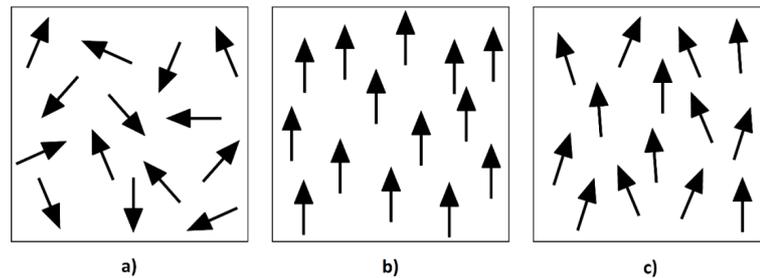


Figura 7. Proceso de polarización de una cerámica piezoeléctrica

- **Monocristales piezoeléctricos:** El proceso consiste en crear de forma artificial un elemento piezoeléctrico formado por un único cristal. Así, todos los dipolos de la pieza se agrupan en un único dominio quedando todos ellos alineados, mejorando las propiedades piezoeléctricas en comparación con el mismo material formado en condiciones naturales. [9].
- **Polímeros piezoeléctricos:** Los primeros polímeros piezoeléctricos eran compuestos orgánicos que, enfriados en presencia de un campo eléctrico se polarizaban. Sin embargo, este tipo de materiales no empezaron a ser atractivos hasta el descubrimiento del PVDF (Polímero de Fluoruro de Polivinilideno). A pesar de que es un campo ampliamente estudiado, el conocimiento teórico aún no ha dado los frutos que cabría esperar a nivel práctico, aunque muchos expertos coinciden en que los polímeros jugarán un papel importante en el futuro de los piezoeléctricos, ampliando en gran medida sus ámbitos de aplicación, bastante limitados hoy en día [8].
- **Composites piezoeléctricos:** Son materiales compuestos por varias fases, siendo una de ellas algún tipo de cerámica piezoeléctrica (fase activa) y la otra un polímero o vidrio (matriz) [9]. La ventaja de estos materiales reside en la capacidad de diseñarlos específicamente para que trabajen en las direcciones deseadas mediante el diseño de la geometría interna del composite [9].

2.2.4 ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LA PIEZOELECTRICIDAD

Antes de describir las ecuaciones de la piezoelectricidad, conviene describir las propiedades elásticas y dieléctricas de los materiales, que están interrelacionadas con las piezoeléctricas en los materiales en que estas se manifiestan.

2.2.4.1 CASO GENERAL MATERIALES ELÁSTICOS Y DIELECTRICOS

En el caso general, en un material elástico ordinario, las tensiones y las deformaciones están relacionadas entre sí. La tensión mecánica o tensión T es la fuerza F aplicada por unidad de superficie S . Debido a la tensión aplicada, ya sea de tracción, de compresión o de cizalla, se produce una deformación.

La elasticidad estudia las relaciones entre las tensiones y las deformaciones en los materiales que cumplen la Ley de Hooke. De forma general, esta ley dice que “las deformaciones producidas en un material elástico son proporcionales a las tensiones que las producen”: $T = Y \cdot \frac{dl}{l_0}$, donde $\frac{dl}{l_0}$ es la deformación relativa, que normalmente se denomina deformación (s), y donde Y es el módulo de Young del material. El módulo de Young es un indicador de la rigidez de un material cerámico. Se obtiene a partir de la tensión aplicada dividido por el valor de la deformación resultante en la misma dirección.

$$Y = T/s$$

En el caso general, la tensión mecánica que actúa sobre un elemento de volumen se representa por una matriz simétrica 3x3:

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

Donde σ_{ij} es la tensión que actúa en la dirección j sobre la cara i del elemento de volumen.

Así mismo, en un material dieléctrico ordinario, el vector desplazamiento eléctrico (D) es la permitividad (ϵ) por el campo eléctrico (E): $D = \epsilon \cdot E$.

Si en un material las propiedades elásticas y dieléctricas están interrelacionadas, se puede decir que es un material piezoeléctrico.

2.2.4.2 ECUACIONES PIEZOELECTRICIDAD

Como se ha dicho, para poder entender las constantes piezoeléctricas, es necesario saber que se trata de materiales anisótropos. Esto hace necesario definir constantes diferentes en función de las direcciones de tensión-deformación mecánicas, así como de los campos eléctricos, ya sean aplicados los primeros y generados los segundos o viceversa. Por ello, se utiliza un sistema de dos subíndices numéricos que indican estas direcciones. El primer subíndice indica la dirección de las fuerzas eléctricas, ya sean aplicadas o producidas en el piezoeléctrico, mientras el segundo subíndice indica las fuerzas mecánicas. [2]

Las ecuaciones constitutivas que describen la piezoelectricidad se basan en la suposición de que la deformación total en el transductor es la suma de la deformación mecánica inducida por la tensión mecánica y la deformación de accionamiento controlable causada por el voltaje eléctrico aplicado. [2]

En coordenadas cartesianas, los ejes se identifican por números en lugar de letras. En el 1 se refiere al eje x, el 2 corresponde al eje y, y el 3 corresponde al eje z. El eje 3 se asigna a la dirección de polarización inicial de la piezocerámica, y los ejes 1 y 2 se encuentran perpendiculares al plano del eje 3. Esto se muestra más claramente en la siguiente figura:

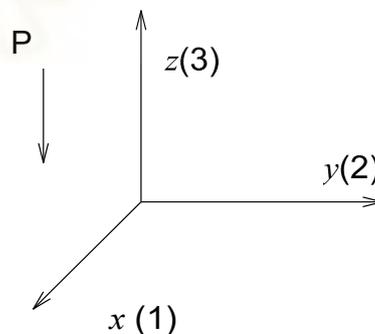


Figura 8. Ejes cartesianos

Las ecuaciones electromecánicas que describen un material piezoeléctrico lineal se pueden describir como:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} \sigma_i + \xi_{ik}^\sigma E_k \quad (2)$$

Donde los subíndices $i,j=1,2,\dots,6$ y $m,k=1,2,3$ se refieren a diferentes direcciones dentro del sistema de coordenadas del material. Estos subíndices también sirven para describir los distintos modos de operación, que son las direcciones de la tensión mecánica aplicada y el campo eléctrico generado.

En las ecuaciones anteriores, el significado de los símbolos son los siguientes:

- σ . . . vector tensión mecánica (N/m²)
- ε . . . vector deformación (m/m)
- E . . . vector campo eléctrico aplicado (V/m)
- ξ . . . permitividad (F/m)
- d . . . matriz constante piezoeléctrica deformación (m/V)
- S . . . matriz coeficientes de compliancia (m²/N)
- D . . . vector desplazamiento eléctrico (C/m²)

Además, los superíndices D , E y σ representan mediciones tomadas con un desplazamiento eléctrico constante, campo eléctrico constante y tensión constante.

La ecuación (1) expresa el efecto piezoeléctrico inverso, que describe la situación cuando el dispositivo se está usando como actuador. La ecuación (2) expresa el efecto piezoeléctrico directo, que trata el caso cuando el transductor se usa como sensor. El efecto inverso se usa a menudo para determinar los coeficientes piezoeléctricos. [2]

En forma de matriz, las ecuaciones anteriores se pueden escribir como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & \dots & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11}^\sigma & \xi_{12}^\sigma & \xi_{13}^\sigma \\ \xi_{21}^\sigma & \xi_{22}^\sigma & \xi_{23}^\sigma \\ \xi_{31}^\sigma & \xi_{32}^\sigma & \xi_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Suponiendo que el dispositivo está polarizado a lo largo del eje 3, al ver el material piezoeléctrico como un material isotrópico transversal, cosa que es cierta para las cerámicas piezoeléctricas, muchos de los parámetros en las matrices anteriores serán 0, o se pueden expresar en términos de otros parámetros. En particular, los coeficientes de compliancia distintos de cero son:

$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} \\ S_{13} &= S_{31} = S_{23} = S_{32} \\ S_{12} &= S_{21} \\ S_{44} &= S_{55} \\ S_{66} &= 2(S_{11} - S_{12}) \end{aligned}$$

Las constantes de deformación piezoeléctricas son:

$$\begin{aligned} d_{31} &= d_{32} \\ d_{15} &= d_{24} \end{aligned}$$

Los coeficientes dieléctricos distintos de 0 son:

$$\begin{aligned} \xi_{11}^\sigma &= \xi_{22}^\sigma \\ &\xi_{33}^\sigma \end{aligned}$$

Posteriormente, las ecuaciones (3) y (4) se simplifican como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11}^\sigma & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{11}^\sigma & 0 \\ 0 & 0 & \xi_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La constante de deformación piezoeléctrica d , se define como la relación entre la deformación libre producida y el campo eléctrico aplicado. El subíndice d_{ij} implica que el campo eléctrico se aplica o la carga se recolecta en la dirección i para un desplazamiento o fuerza en la dirección j . [2]

El significado de las constantes piezoeléctricas se explicará en la siguiente sección.

2.2.5 COEFICIENTES PIEZOELÉCTRICOS

En este apartado se describirán los distintos parámetros y constantes vistos en el apartado anterior. Para tener en cuenta todas las posibles constantes, hay que tener en cuenta que las cerámicas piezoeléctricas son anisótropas, ya que sus constantes varían dependiendo de la dirección. Las constantes físicas se relacionan tanto con la dirección de la fuerza mecánica o eléctrica aplicada como con la dirección perpendicular a ésta. Por lo tanto, cada constante tendrá dos subíndices que indicarán las direcciones de las fuerzas. La dirección de polarización generalmente coincide con el eje con dirección 3 positiva. [2]

2.2.5.1 CONSTANTE CARGA/DEFORMACIÓN PIEZOELÉCTRICA d_{ij}

El coeficiente de carga piezoeléctrico d_{ij} (m/V o C/N) es la relación entre la deformación en el eje j y el campo eléctrico aplicado a lo largo del eje i , cuando todas las tensiones mecánicas se mantienen constantes. En la figura 9, si se aplica un voltaje V a un transductor piezoeléctrico que está polarizado en el eje o dirección 3, este voltaje genera el campo eléctrico:

$$E_3 = \frac{V}{t}$$

que deforma el transductor. En particular:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l}$$

en el que:

$$\Delta l = \frac{d_{31}Vl}{t}$$

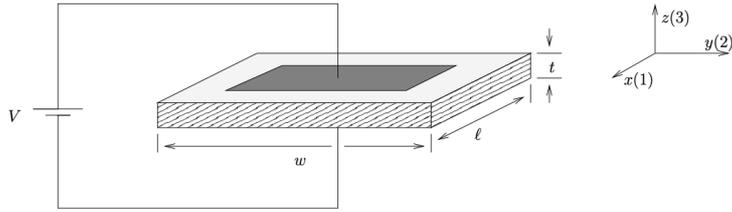


Figura 9. Disposición de un transductor piezoeléctrico para medir d_{31}

Otra interpretación de d_{ij} es la relación entre la carga de cortocircuito por unidad de área entre los electrodos conectados perpendiculares a la dirección j y a la tensión mecánica aplicada en la dirección i . Como se ve en la Figura 10, si se aplica una fuerza F al transductor, en la dirección 3 se genera la tensión mecánica:

$$\sigma_3 = \frac{F}{lw}$$

Lo que resulta en la carga eléctrica: $q = d_{33} \cdot F$ fluyendo a través del cortocircuito.

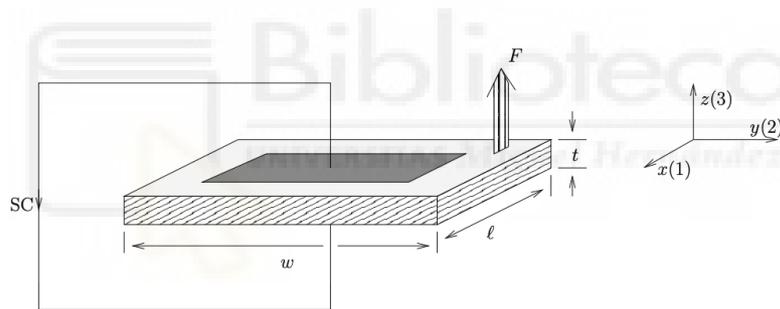


Figura 10. Deposición de carga en un transductor piezoeléctrico.

Si una tensión se aplica por igual en las direcciones 1, 2 y 3, y los electrodos son perpendiculares al eje 3, la carga de cortocircuito resultante (por unidad de área) dividida por la tensión aplicada, se denota por d_p . [2]

2.2.5.2 CONSTANTE VOLTAJE PIEZOELÉCTRICA g_{ij}

La constante piezoeléctrica g_{ij} (V/N) es el campo eléctrico desarrollado a lo largo del eje i cuando el material se tensiona mecánicamente a lo largo del eje j . Por lo tanto, en la figura 11, la fuerza F aplicada resulta en el voltaje:

$$V = \frac{g_{31}F}{w}$$

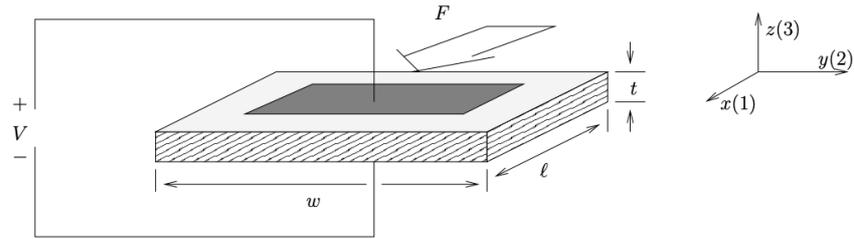


Figura 11. Fuerza aplicada en piezoeléctrico induce carga eléctrica

Otra interpretación de g_{ij} es la relación de deformación desarrollada a lo largo del eje j por la carga (por unidad de área) depositada en electrodos perpendiculares al eje i . Si se deposita una carga eléctrica Q en los electrodos de superficie, el espesor del elemento cambiará en: [2]

$$\Delta l = \frac{g_{ij}Q}{w}$$

2.2.5.3 COMPLIANCIA ELÁSTICA S_{ij}

La constante de compliancia elástica S_{ij} es la relación entre la deformación en la dirección i y la tensión mecánica en la dirección j , dado que no hay cambio de tensión mecánica en las otras dos direcciones. Las deformaciones y las tensiones mecánicas directas se indican con los índices 1 a 3. Las deformaciones y tensiones de corte (cizalla) se indican con los índices 4 a 6. Posteriormente, S_{12} significa la deformación directa en el eje 1 cuando el dispositivo se tensiona mecánicamente a lo largo del eje 2 y las tensiones mecánicas a lo largo de las direcciones 1 y 3 no cambian [2].

2.2.5.4 COEFICIENTE DIELÉCTRICO ξ_{ij} (PERMITIVIDAD)

El coeficiente dieléctrico ξ_{ij} determina la carga por unidad de área en el eje i debido a un campo eléctrico aplicado en el eje j . En la mayoría de los materiales piezoeléctricos, un campo aplicado a lo largo del eje j causa un desplazamiento eléctrico solo en esa dirección. La constante dieléctrica relativa, definida como la relación de la permitividad absoluta del material por la permitividad del espacio libre, se denota como Q . El superíndice σ en ξ_{11}^{σ} se refiere a la permitividad de un campo aplicado en la dirección 1, cuando el material está sometido a una tensión mecánica constante. [2]

2.2.5.5 COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO PIEZOELÉCTRICO K_{ij}

El coeficiente K_{ij} representa la capacidad de un material piezo cerámico para transformar la energía eléctrica en mecánica y viceversa. Esta transformación de energía entre dominios mecánicos y eléctricos se emplea tanto en sensores como actuadores hechos de materiales piezoeléctricos.

El índice ij indica que la tensión o la deformación está en la dirección j y los electrodos están perpendiculares al eje i . Por ejemplo, si un piezocerámico está forzado (deformado) mecánicamente en la dirección 1, como resultado de la entrada de energía eléctrica en la dirección 3, mientras que el dispositivo no está bajo ninguna tensión mecánica externa, entonces la relación de energía mecánica almacenada por la energía eléctrica aplicada se denota como K_{31}^2 .

Hay varias formas en que se puede medir K_{ij} . Una posibilidad es aplicar una fuerza al elemento piezoeléctrico, dejando sus terminales en circuito abierto. El dispositivo piezoeléctrico se desviará de manera similar a un resorte. Esta desviación z se puede medir y se puede determinar el trabajo mecánico realizado por la fuerza aplicada F :

$$W_M = \frac{F\Delta z}{2}$$

Debido al efecto piezoeléctrico, las cargas eléctricas se acumularán en los electrodos del transductor. La energía eléctrica asociada a esta acumulación de cargas es:

$$W_E = \frac{Q^2}{2C_p}$$

Que se almacena en el condensador piezoeléctrico. Por lo tanto:

$$K_{33} = \sqrt{\frac{W_E}{W_M}} = \frac{Q}{\sqrt{F\Delta z C_p}}$$

El coeficiente de acoplamiento se puede escribir en términos de otras constante piezoeléctricas. En particular:

$$K_{ij}^2 = \frac{d_{ij}^2}{S_{ij}^E e_{ij}^\sigma} = g_{ij} d_{ij} Y_p$$

Donde Y_p es el módulo de Young del material piezoeléctrico.

Cuando se aplica una fuerza a un transductor piezoeléctrico, dependiendo de si el dispositivo está en circuito abierto o en cortocircuito uno debe esperar observar diferentes rigideces. En particular, si los electrodos están en cortocircuito, el dispositivo parecerá ser “menos rígido”. Esto se debe al hecho de que al aplicar una fuerza, las cargas eléctricas de polaridades opuestas acumuladas en los electrodos se anulan entre sí. Posteriormente, no se podría almacenar energía eléctrica en el condensador piezoeléctrico. Si K_{sc} es la rigidez del cortocircuito y K_{oc} es la rigidez del circuito abierto, se puede probar que:

$$\frac{K_{oc}}{K_{sc}} = \frac{1}{1 - K^2}$$

A continuación, podemos ver una tabla con la comparación de distintos elementos piezoeléctricos respecto a diferentes constantes descritas

Composition	ϵ_{33}/ϵ_0	d_{33} (pC/N)	g_{33} (V m/N)	$d_{33} \cdot g_{33}$ (m ² /N)	n
Morgan electroceramics					
PZT 701	425	153	41×10^{-3}	6273×10^{-15}	1.165
PZT 703	1100	340	30×10^{-3}	10200×10^{-15}	1.181
PZT 502	1950	450	25×10^{-3}	11250×10^{-15}	1.204
PZT 507	3900	700	20×10^{-3}	14000×10^{-15}	1.227
American Piezoelectric Ceramics International					
APC 880	1000	215	25×10^{-3}	5375×10^{-15}	1.20
APC 840	1250	290	26.5×10^{-3}	7685×10^{-15}	1.198
APC 841	1350	300	25.5×10^{-3}	7650×10^{-15}	1.202
APC 850	1750	400	26×10^{-3}	10400×10^{-15}	1.203
APC 855	3400	620	21×10^{-3}	12600×10^{-15}	1.224
Ferroperm Piezoceramics					
Pz 24	400	190	54×10^{-3}	10260×10^{-15}	1.150
Pz 26	1300	300	28×10^{-3}	8400×10^{-15}	1.199
Pz 39	1780	480	30×10^{-3}	14400×10^{-15}	1.194
Pz 52	1900	420	25×10^{-3}	10500×10^{-15}	1.206
Pz 29	2900	575	23×10^{-3}	13225×10^{-15}	1.217
Edo Corporation					
EC-63	1300	295	24.1×10^{-3}	7109.5×10^{-15}	1.20
EC-65	1725	380	25×10^{-3}	9500×10^{-15}	1.205
EC-70	2750	490	20.9×10^{-3}	10241×10^{-15}	1.222
EC-76	3450	583	19.1×10^{-3}	11135.3×10^{-15}	1.228

Tabla 1. Comparación de cerámicas comerciales en función de sus constantes [7]

3. TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS Y CIRCUITO ACONDICIONADOR. ASPECTOS DE DISEÑO Y APLICACIONES.

En el siguiente capítulo, se van a analizar los principales modos de operación de un sensor piezoeléctrico según las direcciones en las que se le estimule y de acuerdo con el coeficiente de carga o deformación d y los distintos tipos de configuraciones que puede tener un sensor piezoeléctrico. Se estudiarán los componentes principales de un circuito acondicionador (puente rectificador y conversor DC/DC) que hacen posible que se pueda usar el transductor piezoeléctrico como generador, viendo finalmente algunas de las investigaciones más recientes basados en la generación de energía a partir de las vibraciones.

3.1 MODOS DE OPERACIÓN

Tal y como se introdujo en el apartado 2.2.4.3, se puede definir en los materiales piezoeléctricos un modo de operación que viene a indicar las direcciones de la tensión mecánica de excitación y del campo eléctrico resultante en un transductor piezoeléctrico, con referencia a los ejes x , y y z (numerados del 1 al 3) y los cortes sobre estos, indicando rotación sobre los mismos (numerados del 3 al 6).

A continuación, se describirá los modos más comunes, el modo d_{31} y el d_{32} .

A parte del modo d_{31} y d_{32} , existen otras configuraciones como el modo d_{33} . y el modo d_{15} . El modo d_{33} fue desarrollado para incrementar la energía extraída del transductor. Por su parte, el modo d_{15} ofrece un mejor rendimiento, pero requiere un proceso complejo de fabricación.

3.1.1 MODO DE OPERACIÓN d_{31}

En el modo de operación d_{31} el material presenta un campo eléctrico inducido en la dirección 3 como respuesta a una tensión mecánica en la dirección 1, como se puede observar en la siguiente figura:

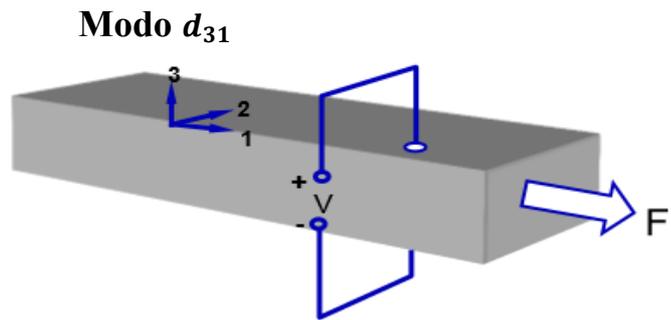


Figura 12. Modo operación d_{31} .

En este caso la salida eléctrica es proporcional al coeficiente d_{31} según la ecuación descrita en el apartado 2.2.4.3, de ahí el nombre del modo.

3.1.2 MODO DE OPERACIÓN d_{32}

En el modo de operación d_{32} el material presenta un campo eléctrico inducido en la dirección 3 como respuesta a una tensión mecánica en la dirección 2, como se puede observar en la siguiente figura:

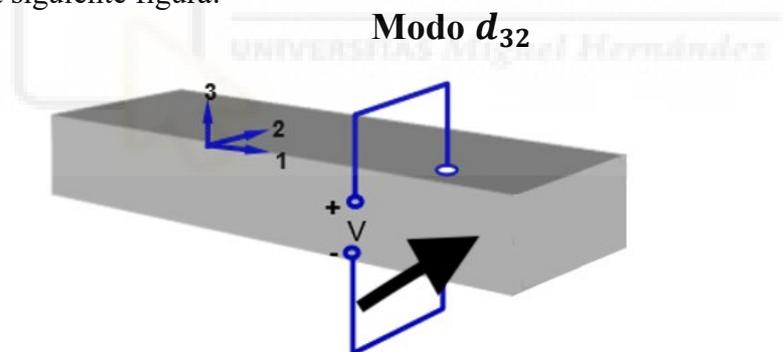


Figura 13. Modo de operación d_{32} .

3.2 TIPOS DE CONFIGURACIÓN

A la hora de diseñar un sistema de recolección de energía basado en la recolección de energía en forma de vibraciones, deberemos diseñar la forma y configuración de nuestro piezoeléctrico de manera que podamos aprovechar al máximo las características del entorno para la máxima recolección de energía. Algunos de los tipos de configuración más comunes se comentan en este apartado.

3.2.1 VIGA EN VOLADIZO (CANTILEVER)

La configuración del tipo viga en voladizo es una de las estructuras más simples para recolección de energía mediante vibraciones, que, además puede producir una gran deformación bajo estas vibraciones (figura 14). Esta estructura consiste en una o dos láminas de material piezoeléctrico con los electrodos en la capa superior e inferior, fijas en un extremo. En el extremo contrario esta libre, y en él se coloca una masa que hace que aumente la deformación de las minas piezoeléctricas, para ajustar esta masa se deberá tener en cuenta la frecuencia de trabajo que requiere la aplicación. Se han realizado multitud de estudios basados en esta configuración, demostrando su gran campo de aplicación.

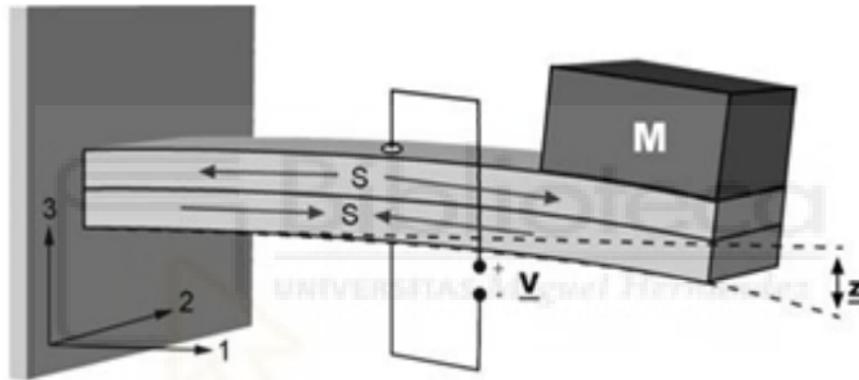


Figura 14. Configuración tipo viga en voladizo [10]

3.2.2 TIPO PILA (STACK)

La configuración tipo pila consiste en una pila de capas (laminas) de material piezoeléctrico (figura 15). Estas capas se colocan con polarización opuesta entre las capas adyacentes. Las capas son conectadas mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo. Cuanto mayor número de capas tenga la pila, aumenta su volumen y por tanto incrementa la energía que produce. Utiliza el modo 33 y tiene una gran capacidad debido al número de capas de material piezoeléctrico. Este tipo de configuración tipo pila tiene como desventaja que puede ser débil bajo golpes mecánicos.[12]

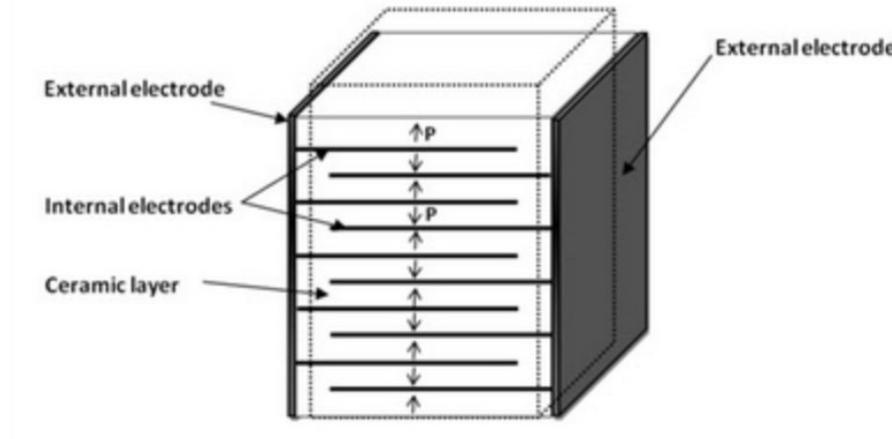


Figura 15. Configuración tipo pila (stack) [12]

3.2.3 TIPO CONCHA (SHELL)

La configuración tipo concha, consiste en una lámina de piezoeléctrica curva (figura 16). Esta estructura en forma curvada puede generar mayor tensión que una lámina plana, por lo que puede mejorar la eficiencia en el cosechamiento de energía por el efecto piezoeléctrico.

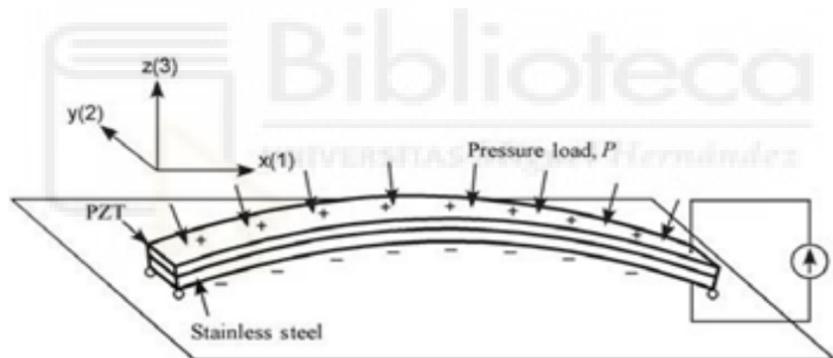


Figura 16. Configuración tipo concha [10]

3.2.4 TIPO CÍMBALO (CYMBAL)

Las configuraciones con estructura en forma de címbalo pueden producir una gran deformación bajo una fuerza externa transversal. Como se muestra en la figura 17 consiste en dos platillos de metal o cualquier otro material elástico, y una lámina de material piezoeléctrico que recibe la fuerza aplicada sobre los platillos metálicos [11]

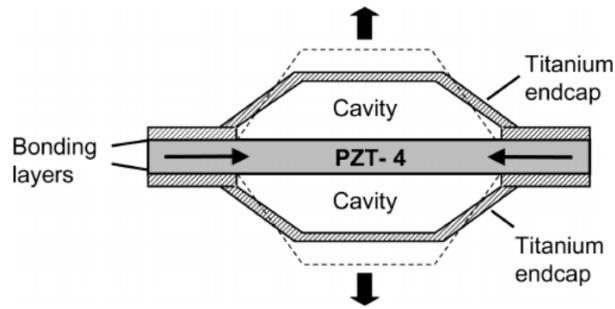


Figura 17. Configuración tipo címbalo. [11]

3.3 CIRCUITO ACONDICIONADOR

Después de que el transductor piezoeléctrico reciba la señal mecánica y la convierta en una señal eléctrica, ésta se tiene que acondicionar para su posible consumo.

Este circuito está compuesto por dos dispositivos diseñados de tal manera que la señal recibida, que es muy débil, pueda ser consumida.

Los dos dispositivos que componen el circuito acondicionador son el rectificador de onda completa y el convertor DC/DC.

3.3.1 RECTIFICADOR MONOFÁSICO CONTROLADO DE ONDA COMPLETA.

El rectificador se encarga de convertir un voltaje alterno en otro continuo. La siguiente figura nos muestra el circuito completo de un rectificador monofásico controlado de onda completa. En él, se recibe la señal V_s , que es la señal alterna que el transductor piezoeléctrico ha convertido de una señal mecánica y la convierte en una señal en continua V_o .

Para que la señal sea lo más parecido a una señal continua, se tiene que utilizar en paralelo un condensador para reducir el rizado. Cuanto mayor sea el condensador, menor será el rizado.

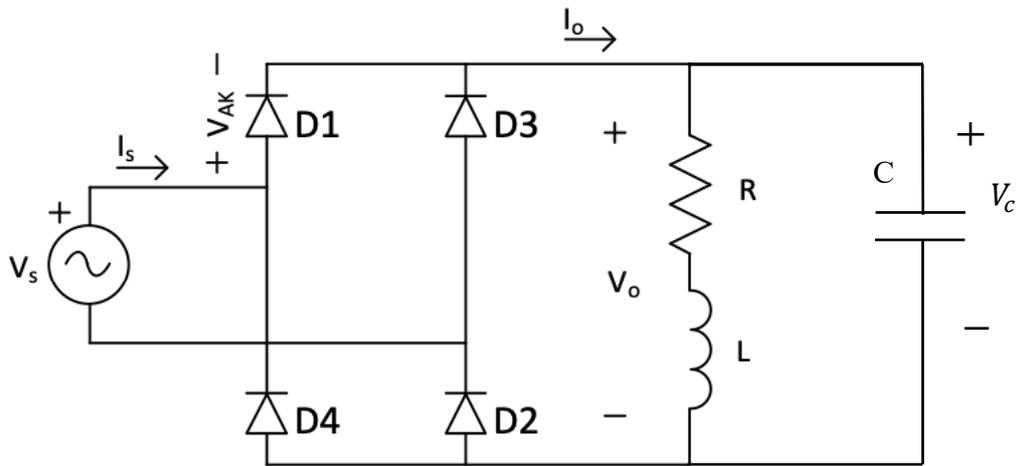


Figura 18. Rectificador monofásico de onda completa [13]

donde el valor medio del voltaje de carga es:

$$V_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s$$

En la ecuación anterior, V_o es el voltaje de salida del rectificador y V_s la señal de entrada al rectificador. La tensión V_c es la tensión al pasar por el condensador de rizado. Esta tensión, dependiendo de la capacidad del condensador, es lo mas parecido a una señal continua.

En el Anexo 6.1, se encuentra más información sobre el puente rectificador de diodos.

3.3.2 CONVERTIDOR DC/DC

Los convertidores DC/DC se emplean para conseguir una tensión de salida estable sin que se vea afectada por fluctuaciones en la entrada de tensión continua o en la carga conectada a la salida. Los convertidores se componen por semiconductores que actúan como interruptores que se abren y se cierran para convertir un nivel de tensión en otro. La tensión media de salida se controla mediante el tiempo en que los semiconductores están en abierto (off-stage) o cerrado (on-stage).

Existe una gran variedad de convertidores DC/DC, cada uno con sus características, pero analizaremos los dos más usados, el convertidor elevador (boost) y el convertidor reductor (buck).

3.3.2.1 CONVERTIDOR ELEVADOR (BOOST)

El convertidor boost es un convertidor DC/DC que obtiene a su salida una tensión continua mayor que a su entrada. Es un tipo de fuente de alimentación conmutada que contiene al menos dos interruptores semiconductores y al menos un elemento para almacenar energía.

El principio básico de este convertidor consiste en dos estados distintos dependiendo del estado del interruptor:

- Cuando el interruptor está cerrado (transistor en saturación), la bobina almacena la energía de la fuente, a la vez la carga es alimentada por el condensador (figura 19).

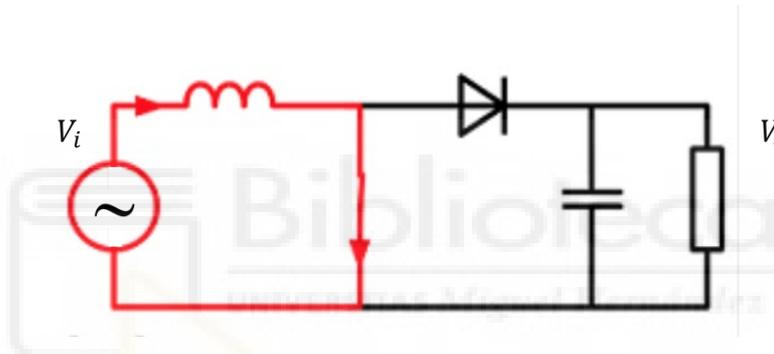


Figura 19. Boost con interruptor cerrado (transistor en saturación, On-State) [13-16]

- Cuando el interruptor está abierto (transistor en corte), el único camino para la corriente es a través del diodo y circula por el condensador (hasta que se carga completamente) y la carga (figura 20).

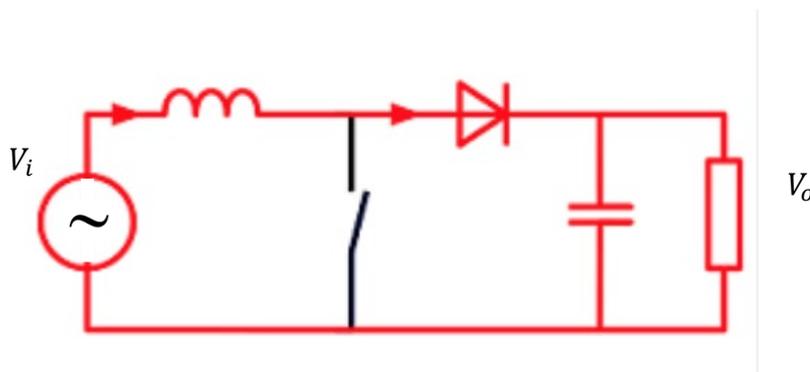


Figura 20. Boost con interruptor abierto (transistor en corte, Off-State) [13-16]

En este caso, la tensión de salida del conversor elevador es:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (10)$$

Donde V_o indica la tensión de salida del convertidor elevador (boost), D es el ciclo de trabajo y V_i es la tensión de entrada.

3.3.2.2 CONVERTIDOR REDUCTOR (BUCK)

El convertidor reductor buck es un convertidor DC/DC que obtiene a su salida una tensión igual o menor que a su entrada. El diseño es similar al del convertidor boost, con una fuente conmutada con dos dispositivos semiconductores, con un inductor tras el interruptor y un condensador a la salida para almacenar la energía.

El principio básico de este convertidor también consiste en dos estados distintos dependiendo del estado del interruptor:

- Cuando el interruptor está cerrado (On-Stage): la energía se transfiere de la fuente a la bobina, al condensador y a la carga (figura 21):

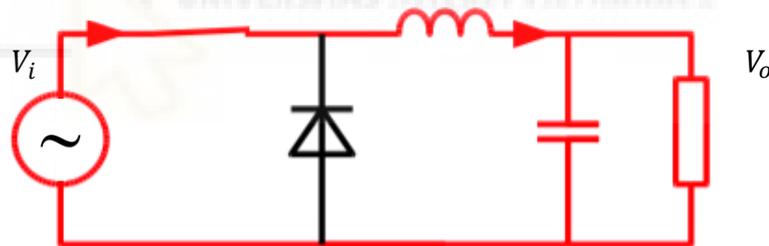


Figura 21. Buck con interruptor cerrado (On-State) [13-16]

- Cuando el interruptor está abierto (Off-Stage): la energía se transfiere de la bobina y el condensador a la carga (figura 22).

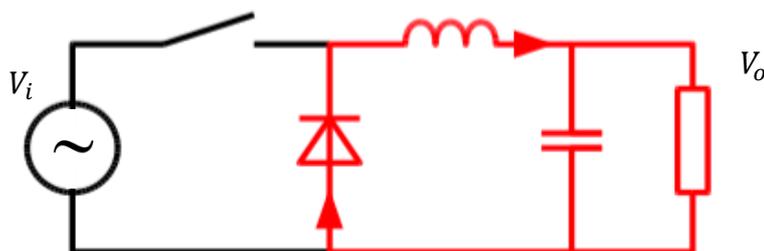


Figura 22. Buck con interruptor abierto (Off-State). [13-16]

En este caso, la tensión de salida del conversor reductor (buck) es:

$$V_o = V_i D$$

donde V_o es la tensión de salida, V_i es la tensión de entrada y D el ciclo de trabajo.

En el Anexo 6.2 se encuentra mas información acerca de estos dos conversores DC/DC

3.4 APLICACIONES DE LOS GENERADORES PIEZOELÉCTRICOS

Algunas de las investigaciones que se han realizado en la última década han desarrollado prototipos y proyectos basados en la generación de energía eléctrica a partir de esfuerzos mecánicos. Algunos ejemplos de éstos se describen a continuación:

- Ingenieros de Israel han realizado pruebas en un tramo de carretera de 100 metros con una red de generadores piezoeléctricos. Se espera que el sistema aumente hasta 400 kW desde un tramo de 1 kilómetro de doble calzada. La red de generadores piezoeléctricos es un invento pionero en el campo de la recolección de energía y genera energía a partir de los cambios de peso, movimiento y vibración. Sin embargo, el sistema puede configurarse para generar y almacenar energía de carreteras, pistas de aeropuertos y sistemas ferroviarios al mismo tiempo que proporciona datos en tiempo real sobre el peso, la frecuencia y el espacio entre los vehículos que pasan. La energía recolectada puede ser transferida de nuevo a la red, o utilizada para propósitos de infraestructura pública específica, como la iluminación. [17][18]
- Científicos de EE.UU. tienen una propuesta experimental que aprovecha las oscilaciones de una bandera. Las banderas en cuestión aprovechan el aleteo típico que se produce en la cola de éstas cuando sopla una racha de viento para producir energía eléctrica. El medio para conseguir esta conversión es el material del que está recubierta la lona de la bandera: un material piezoeléctrico. En el experimento se trabajó con vientos controlados de 5 a 9 m/s (con una longitud de la bandera de 60mm) y de 2.5 a 4.5 m/s (con una longitud de bandera de 100mm) con una generación de potencia de entre 1-5 mW y 0.1-0.4 mW respectivamente. [19][20]

- Según el artículo [21], en Brasil se estudia la posibilidad de aplicar material piezoeléctrico en buques de carga con el fin de verificar la cantidad de energía que puede ser generada, para satisfacer las necesidades energéticas de sistemas de navegación, puente de mando o cocinas. La electricidad recolectada proviene de la deformación de material PZT causado por las frecuencias de vibración de la sala de máquinas y por las frecuencias de vibración generadas por las olas del mar en contacto con la superficie de casco del barco. De esta forma se desarrolló un prototipo que genera energía a través de la vibración de un motor eléctrico de 12 V, en el que se obtuvo una tensión máxima de 45.36 V, con una corriente de 5.04 mA, que corresponden a una potencia eléctrica de 0.22861 W.
- También se ha desarrollado un transductor piezoeléctrico para recolectar la energía de las olas [22]. El recolector está hecho de un sistema masa-resorte utilizado para transferir las oscilaciones de las olas a vibraciones mecánicas y dos dispositivos piezoeléctricos utilizados para amplificar y transferir la vibración mecánica acumulada a energía eléctrica. Los resultados muestran que se puede recolectar una potencia de hasta 103 W con una amplitud de una ola de mar de 2 m y 6 s, para un transductor de 100 kg con 1 m de ancho, 0.5 m de alto y 1 m de largo. Algo parecido ocurre en el trabajo realizado en [23], donde en los resultados obtenidos al transformar la energía mecánica producida por las olas en energía eléctrica muestran que la energía aprovechada anualmente será de 1458 kWh, con una potencia media de 16,6 W para un área de $0,1 m^2$.

4. DESARROLLO

Una vez descritas las herramientas y los fenómenos físicos que se van a utilizar, se van a describir los datos del transductor piezoeléctrico que se va a utilizar y caracterizar, tanto como transductor electromecánico, como mecanoeléctrico. El transductor que se va a utilizar es de tipo voladizo (cantiléver) de la empresa ThorLabs

4.1 MODELO MECÁNICO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

El equivalente mecánico para una estructura piezoeléctrica sujeta a vibraciones se puede modelar según la siguiente figura.

El material piezoeléctrico se comporta como un sistema de masa resorte. Un sistema masa-resorte consiste en una masa m (masa a colocar en el extremo de la estructura cantiléver) unida a un muelle o un resorte fijo, el cual oscila al ser separada de su punto de equilibrio. El resorte o muelle se caracteriza por una constante de deformación, que en nuestro caso se corresponderá con las constantes del piezoeléctrico, donde C_m se corresponde al compliancia mecánica y r_m se corresponde con la resistencia mecánica asociada a cualquier fricción presente en el sistema.

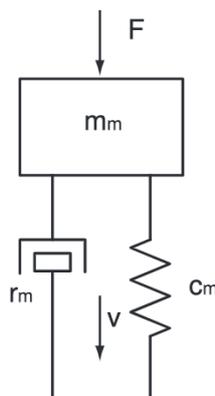


Figura 23. Modelo equivalente mecánico de un generador piezoeléctrico [24]

El modelado mecánico anterior tiene su equivalente eléctrico y electromecánico como se muestra en la siguiente figura. La masa mecánica corresponde a la inductancia (L) en el

modelo eléctrico. La compliancia mecánica corresponde con una capacidad (C). La resistencia mecánica corresponde con una resistencia (R) eléctrica. A su vez, la fuerza (F) ejercida corresponde a un voltaje V en el modelo eléctrico.

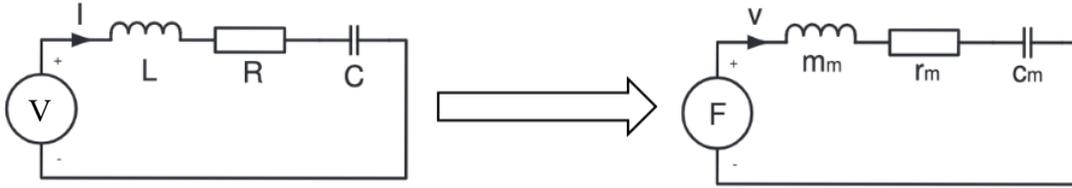


Figura 24. Modelo eléctrico y electromecánico del equivalente mecánico de un generador piezoeléctrico. [24]

Finalmente, si añadimos la capacidad interna del elemento piezoeléctrico, (C_o), tendremos un modelo electromecánico como el de la siguiente figura, en el que además se añade una resistencia R_o y un transformador ideal que indica la transducción de corriente mecánica (velocidad) a corriente eléctrica.

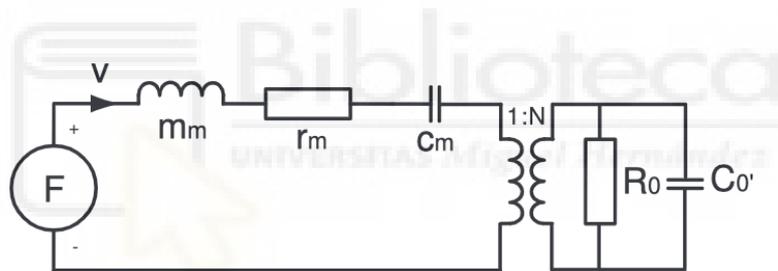


Figura 25. Modelo electromecánico equivalente para un generador piezoeléctrico.

4.2 TRANSDUCTOR PB4NB2 DE THORLABS

Se trata de un transductor de tipo cantiléver (placa en voladizo) con una capa de piezoeléctrico PZT en cada cara, separadas por una lámina conductora que permite polarizar cada cara de forma independiente.

Dimensiones: Largo: 32.0 ± 0.5 mm, Ancho: 7.8 ± 0.1 mm, Espesor: 0.8 ± 0.1 mm
 Longitud libre (desde la sujeción mecánica hasta el extremo libre): 28 mm

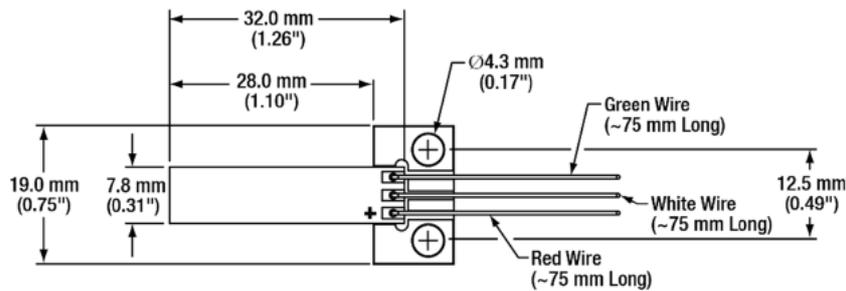


Figura 26. Transductor PB4NB2 de ThorLabs

Capacidad: $550 \text{ nF} \pm 15\%$ (por cada cara)

Frecuencia de resonancia sin carga externa (según el fabricante): 370 Hz

Según el fabricante, con un voltaje DC de 150 V se produce un desplazamiento del extremo de $\pm 450 \mu\text{m}$.

4.2.1 ESQUEMA DEL TRANSDUCTOR ELECTROMECHANICO

Si el extremo del cantiléver está libre (sin cargas o restricciones mecánicas), la fuerza a la salida del transductor es nula (cortocircuito mecánico). El circuito equivalente del transductor en esta situación es el siguiente:

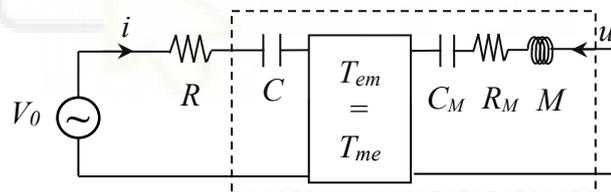


Figura 27. Esquema del transductor electromecánico sin carga mecánica

donde,

R: resistencia conectada en serie con el transductor como limitador de corriente (es necesaria para evitar daños en el sensor).

C: capacidad entre las placas del transductor.

C_M : compliancia.

R_M : resistencia mecánica asociada a mecanismos disipativos.

M: masa.

4.2.2 ECUACIONES DE TRANSDUCCIÓN (SALIDA SIN CARGA):

Las ecuaciones de transducción para el circuito de la figura 27, en el que no hay fuente de fuerza por el lado mecánico, son las siguientes:

$$\begin{aligned}V_0 &= Z_E \cdot i + T_{em} \cdot u \\0 &= Z_M \cdot u + T_{me} \cdot i\end{aligned}$$

donde se debe incluir la resistencia eléctrica externa R en Z_E .

Si eliminamos la velocidad, obtenemos la impedancia mecánica en función de magnitudes eléctricas medibles (voltaje, corriente):

$$Z_M = \frac{T_{em}^2 i}{Z_E i - V_0}$$

donde hemos tenido en cuenta que $T_{em} = T_{me}$ para un transductor piezoeléctrico. Midiendo el voltaje del generador y la corriente que circula por el transductor, puede obtenerse la impedancia mecánica. Si el modelo de transductor es correcto,

$$Z_M = R_M + \frac{1}{j\omega C_M} + j\omega M$$

$$Z_E = R + \frac{1}{j\omega C}$$

4.2.3 RESONANCIAS

Si calculamos la relación voltaje/corriente, obtenemos la impedancia eléctrica equivalente:

$$Z_{Eq} = \frac{V_0}{i} = Z_E - \frac{T_{em}^2}{Z_M} = R + \frac{1}{j\omega C} - \frac{T_{em}^2}{R_M + \frac{1}{j\omega C_M} + j\omega M}$$

Como las pérdidas en el piezoeléctrico son pequeñas, la resistencia mecánica puede despreciarse en primera aproximación, y resulta:

$$Z_{Eeq} \cong R - \frac{j}{\omega} \left(\frac{1}{C} + \frac{T_{em}^2}{\frac{1}{\omega^2 C_M} - M} \right)$$

A la frecuencia de resonancia, la reactancia se anula (resonancia serie):

$$\omega_{rs} = \frac{1}{\sqrt{(M - T_{em}^2 C) C_M}}$$

$$Z_{Eeq} \cong R - j \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{rs}}\right)^2}{\omega C (1 - M \omega^2 C_M)}$$

Vemos que el denominador se anula (impedancia infinita, resonancia paralelo) para la frecuencia

$$\omega_{rp} = \frac{1}{\sqrt{M C_M}} < \omega_{rs}$$

Por tanto, la impedancia equivalente puede expresarse en la forma

$$Z_{Eeq} \cong R + \frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{rs}}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{rp}}\right)^2}$$

4.3 CARACTERIZACIÓN TRANSDUCTOR PB4NB2S

Para realizar las medidas físicas se va a utilizar un piezoeléctrico tipo viga en voladizo (cantiléver). Este piezoeléctrico “PB4NB2S” de la empresa ThorLabs se va a caracterizar, tanto como transductor electromecánico, así como transductor mecanoeléctrico, que es como nos interesa para el nuestro proyecto.

4.3.1 MEDIDAS COMO TRANSDUCTOR ELECTROMECAÁNICO

Para tomar medidas como transductor electromecánico para medir el desplazamiento, se puede hacer aplicando valores de voltajes DC elevados (hasta 150V) haciendo desplazar el piezoeléctrico hacia un lado o hacia el otro y con un micrómetro, medir la distancia que se ha desplazado; o junto con una señal AC, donde utilizando un generador de señales convencional, se puede hacer vibrar el piezo, y a través de un microscopio electrónico se puede capturar esa vibración y calcular cuanto se ha desplazado.

Este piezoeléctrico puede funcionar de dos maneras diferentes:

1. Polarización unipolar: Solo un electrodo está polarizado respecto a masa. Este modo a su vez tiene 2 formas de operar:

a. Desplazándolo hacia un lado. Para ello, hay que conectar el cable rojo al positivo de la fuente de alimentación y el blanco y verde a masa (figura 29.a). Después de conectar, vamos variando la fuente de alimentación y observamos como se mueve hacia un lado

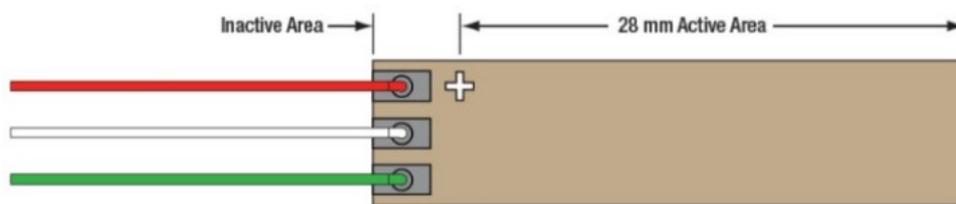
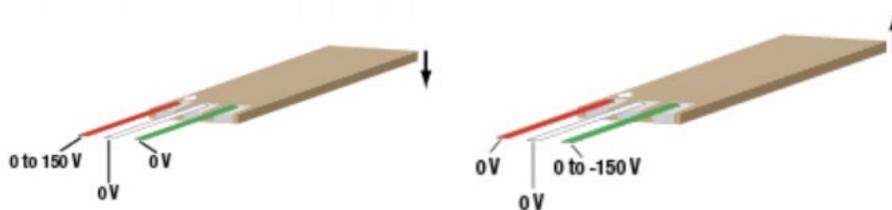


Figura 28. Área activa y disposición electrodos

b. Para que se moviera hacia el otro lado, el cable verde se tendría que conectar a -150 V y los otros dos cables a 0 V (figura 29.b), pero la fuente de alimentación no nos permitía obtener -150 V, por lo que no se ha podido realizar esta prueba.



(Figura 29. a) Conexión para desplazamiento a un lado. (Figura 29. b) Conexión desplazamiento lado contrario.

Para realizar la primera prueba, se ha necesitado una fuente de alimentación de alta tensión, con un regulador para ir incrementando la tensión hasta 150 V. Para realizar las medidas, se ha usado un micrómetro para medir cuánto se había desplazado. Tras realizar la prueba, se han obtenido los siguientes resultados.

Cable Rojo 0 V – 150 V	Desplazamiento (μm)
0	0
20	69
40	199
60	256
80	336
100	399
120	456
150	490

Tabla 2. Desplazamiento (μm) del piezo respecto a la tensión de entrada en cable rojo

La siguiente imagen muestra una grafica con los datos obtenidos de la tabla anterior, que, como se puede observar, a mayor tensión, mayor es el desplazamiento realizado por el piezoeléctrico:

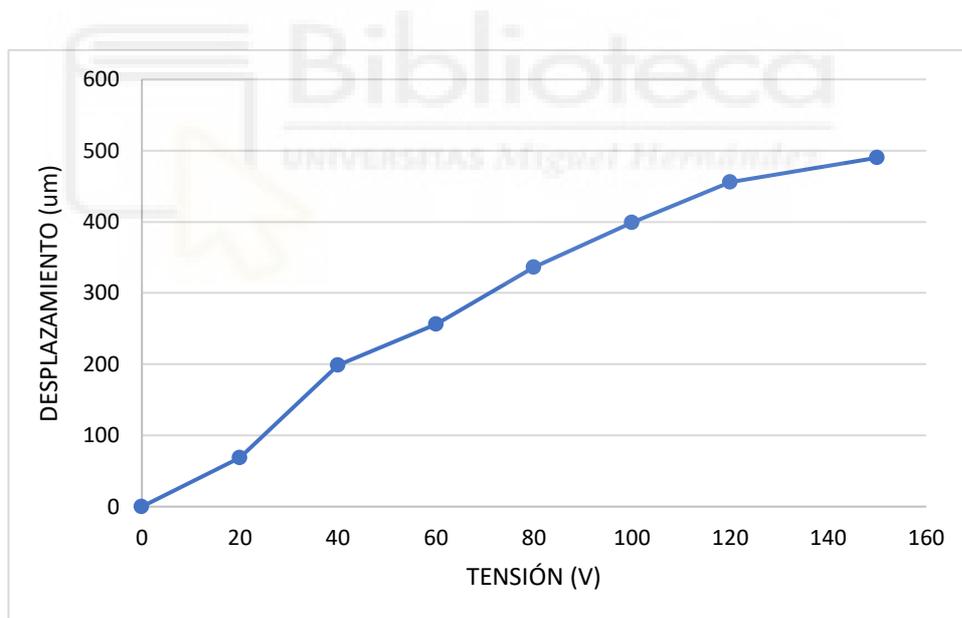


Figura 30. Relación tensión DC entrada / desplazamiento obtenido

La siguiente configuración sería conectar el cable verde a -150 V, pero al no disponer de una fuente de alimentación que nos proporcione esa tensión, no se ha podido realizar esta prueba.

2. Polarización bipolar o diferencial: En esta configuración, hay dos electrodos conectados respecto a masa, es decir, se consigue que se mueva hacia los dos lados. Según el fabricante, tenemos dos opciones para comprobar este modo de operación:

	ROJO	BLANCO	VERDE
OPCIÓN 1	150 V	0 V– 150 V	GND
OPCIÓN 2	75 V	-75 V – 75 V	-75 V

Tabla 3. Conexión electrodos del piezo para polarización bipolar o diferencial.

Por las mismas limitaciones técnicas que en el apartado 1.b, y no disponer de -75 V, solo podemos realizar la opción 1, la cual vamos a realizarla de dos formas distintas: de forma “manual” para poder observar el desplazamiento y medirlo paso a paso; y de forma “automática”, donde se hará vibrar el piezoeléctrico al recibir a su entrada una señal alterna.

- a. de forma manual: para ello conectamos el cable rojo a 150 V, el cable verde a masa y el cable blanco lo conectamos a un potenciómetro, el cual variamos su entrada entre 0 V y 150 V (figura 31).

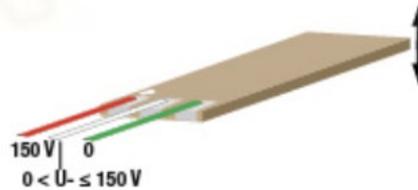


Figura 31. Conexión electrodos para desplazamiento completo

Con esta configuración se han obtenido lo siguiente resultados:

Cable Rojo (V)	Cable Blanco (V)	Desplaz. (μm)
0	0	0
150	0	0
150	20	120
150	40	197
150	60	359
150	75	459
150	80	488
150	100	594
150	120	745
150	140	924
150	150	981

Tabla 4. Desplazamiento (μm) del piezo respecto a la tensión de entrada respecto cables rojo y blanco.

Para entender mejor la tabla anterior, se mostrará la siguiente:

V ROJO (V)	V BLANCO (V)	DESPLAZAMIENTO	DESPLAZAMIENTO (μm)
0	0		0
150	0		-459
150	75		0
150	150		522

Tabla 5. Posición y desplazamiento del piezoeléctrico según tensiones de entrada en cables rojo y blanco.

Sin aplicar tensión a ninguno de sus electrodos, el piezoeléctrico se mantendrá en la posición inicial o de reposo. Cuando el cable rojo se conecta a un voltaje de 150

V, el dispositivo piezoeléctrico se desplaza $490 \mu\text{m}$ hacia un lado. Si vamos incrementando la tensión a través del potenciómetro la tensión que le llega al cable blanco, el piezo empieza a desplazarse hacia el lado contrario hasta llegar al otro extremo. Esto ocurre cuando ambos electrodos reciben 150 V.

- b. De forma automática: para hacer vibrar el piezoeléctrico se ha de diseñar un circuito con el que se consigan 150 Vdc en el cable rojo, 0 V en el cable verde y en el cable blanco, una señal en alterna, donde la señal senoidal de tensión oscila de 0 a 150V.

En esta parte han surgido varios problemas, ya que no se conseguía que el voltaje en el cable blanco variara entre 0 a 150 V, y centrado en 75 V, pese a que las simulaciones con el software ADS eran correctas. Finalmente, se ha conseguido una señal senoidal, centrada en 50 V y que aproximadamente, oscila de 0 a 100 V.

El primer circuito que se diseñó fue el siguiente:

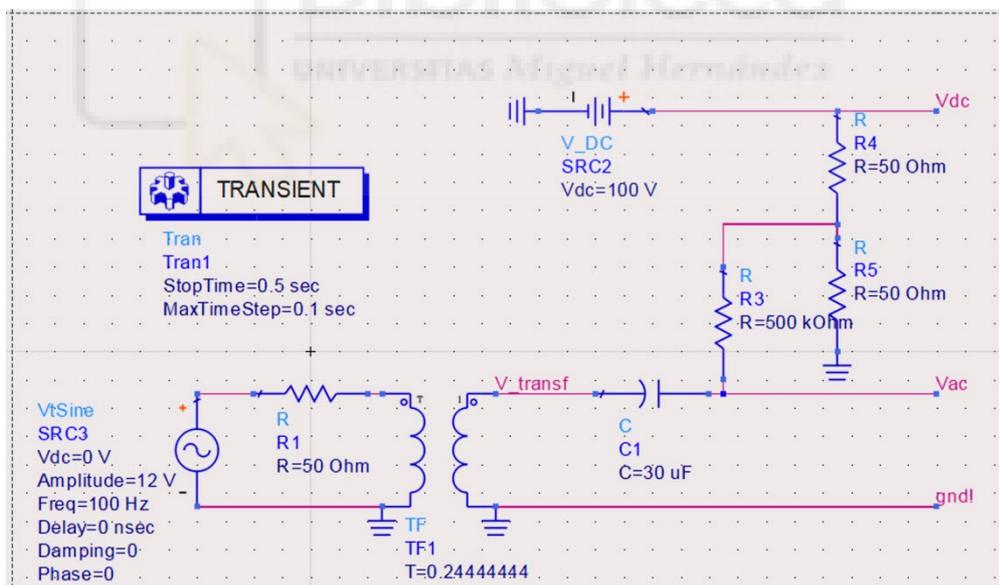


Figura 32. Primer circuito diseñado

Con este circuito, se consiguen 100 V dc que van al cable rojo, 0 V que van al cable verde, y a través de un divisor de tensión desde la fuente de continua y un generador de señales donde la salida se conecta a un transformador, conseguir que el cable blanco vaya de 0 a 100 V centrados en 50 V, como se muestra en la siguiente figura:

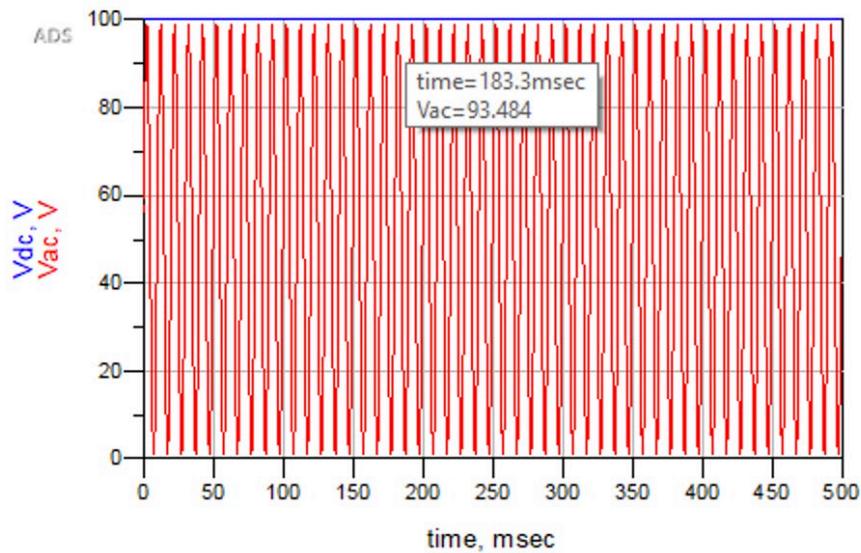


Figura 33. Resultado simulación primer circuito diseñado

En un principio, con este circuito deberíamos tener lo esperado, pero no se ha tenido en cuenta que, al conectar el sensor piezoeléctrico, se conectaban dos condensadores en paralelo propios del piezoeléctrico. Como consecuencia, no se conseguía alcanzar la amplitud de voltaje AC en bornes del piezoeléctrico. Por ello, se tuvo que rediseñar el circuito, que con el software ADS el resultado volvía ser el esperado, sin embargo, al medir se volvía a quedar entre 0-85V aproximadamente. El diseño teniendo en cuenta los condensadores generados por el piezoeléctrico fue el siguiente:

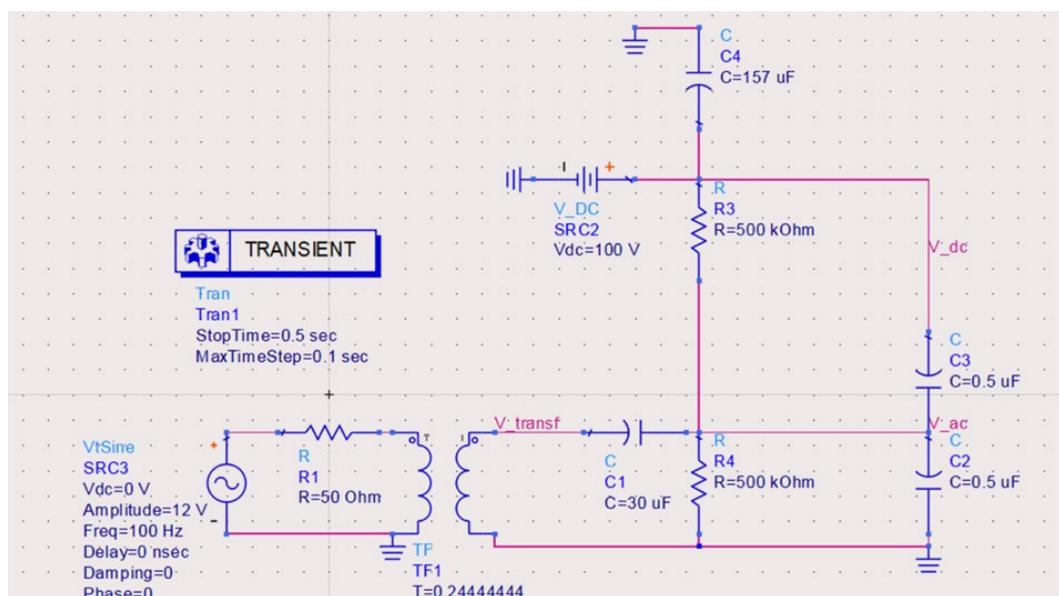


Figura 34. Segundo circuito diseñado

Como resultado de esta simulación, obtenemos una tensión de unos 85Vpp centrado en 50 V y una tensión en continua de 100 V:

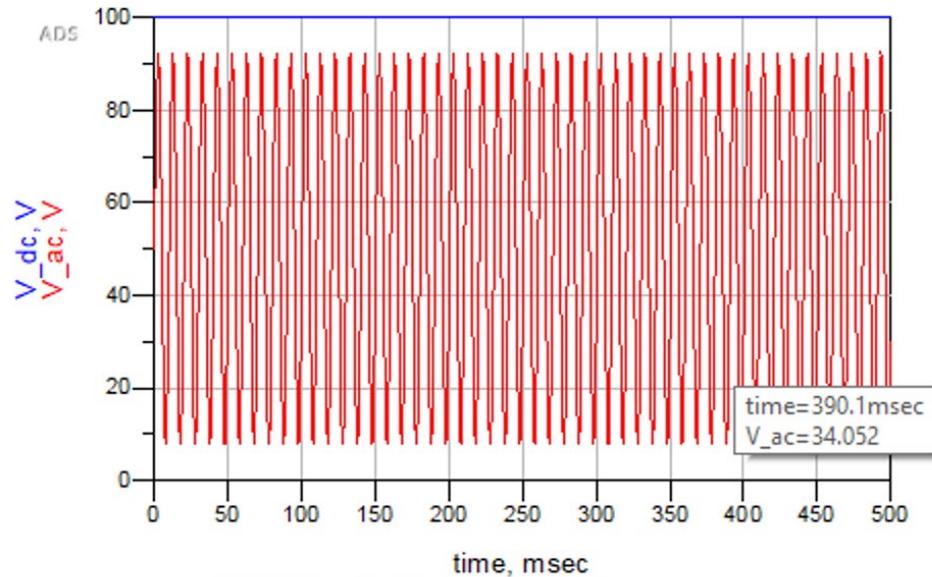


Figura 35. Resultado simulación segundo circuito diseñado

Pese a que, al diseñar el circuito, el valor del condensador elegido es el ofrecido por el fabricante, al implementar el circuito y conectarlo al piezoeléctrico, volvía a disminuir considerablemente la amplitud en bornes del piezoeléctrico, por lo que se decide no utilizar tampoco este circuito.

Finalmente, se decidió utilizar un circuito utilizando un amplificador operacional especial. Este amplificador es el OPA454 que se usa para altos voltajes, como en este caso que llegaremos a 100 V.

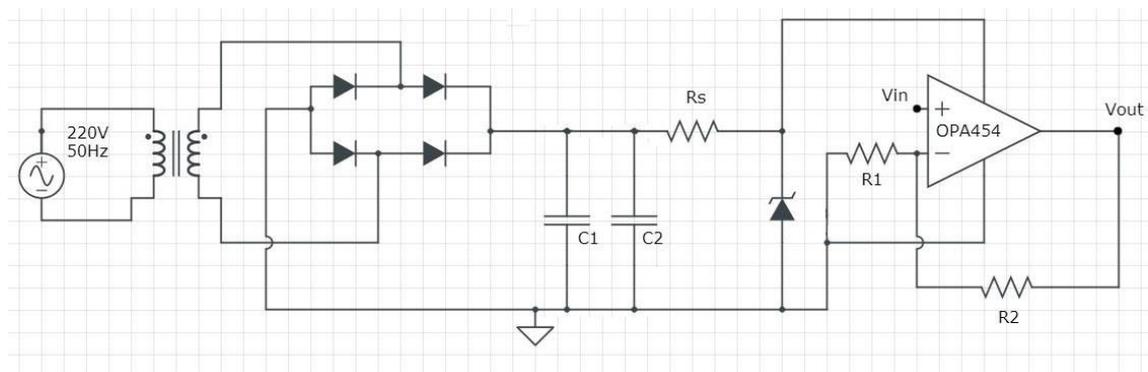


Figura 36. Circuito final con AO

Con este esquema, se consigue a la salida una tensión AC conectada al piezoeléctrico que va de 0-90 V. Para conectarlo al piezoeléctrico, conectamos el cable rojo a 100 Vdc, el cable blanco a la salida Vout del operacional y el cable verde a masa.

Una vez se conecta al piezo, lo hacemos vibrar. Gracias a un microscopio digital, se ha conseguido capturar esas vibraciones. Dependiendo de la frecuencia de la señal AC, la amplitud de las oscilaciones del extremo del piezoeléctrico variará. A continuación, mostramos las imágenes obtenidas para diferentes frecuencias de trabajo.

Sin polarizar, según el fabricante, el espesor del piezoeléctrico es de 0,8 mm

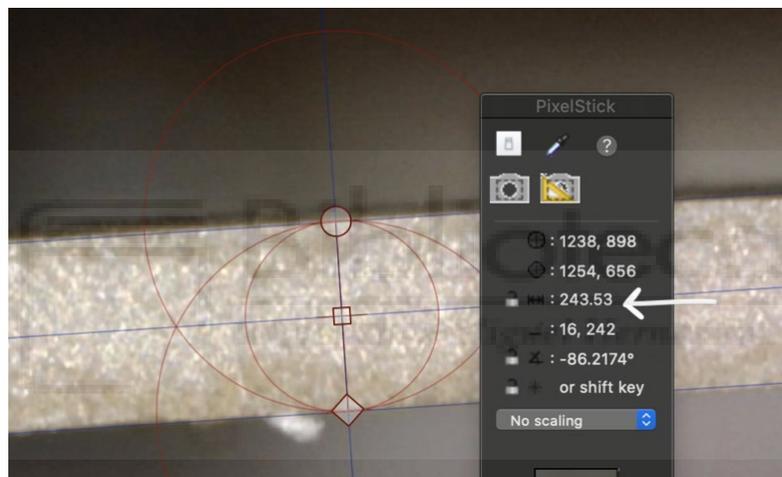


Figura 37. Imagen del perfil del piezo sin voltaje AC

Con un programa gráfico (PixelStick) podemos establecer un factor de escala entre el espesor real y la dimensión correspondiente en la imagen, que nos permita calcular el desplazamiento del piezoeléctrico.

Para poder calcular el desplazamiento del piezo, se ha usado la relación usada en el Anexo 6.3. Con esta relación, podemos determinar el desplazamiento del dispositivo piezoeléctrico.

Estableciendo un factor de escala, podemos afirmar que el piezo, a 75 Hz pasa a tener un “espesor” de 1,20 mm. Por lo tanto, se puede calcular el desplazamiento que ha hecho el piezo, que resulta ser de 0,2 mm.

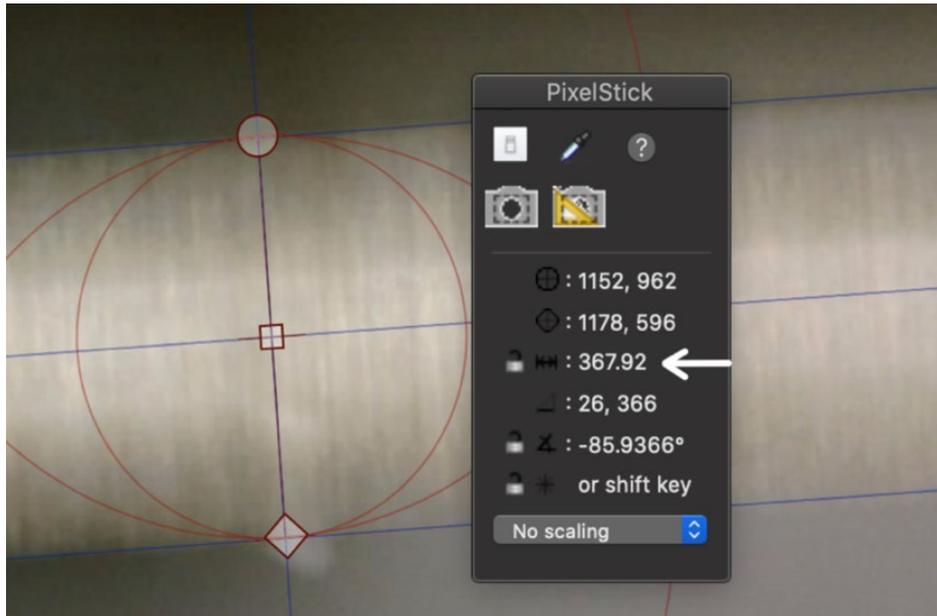


Figura 38. Imagen del piezo en vibración a 75Hz

Al igual que antes, estableciendo un factor de escala, el piezo, a 125 Hz pasa a tener un “espesor” de 1,29 mm, por lo que el desplazamiento que ha hecho el piezo es de 0,245 mm.

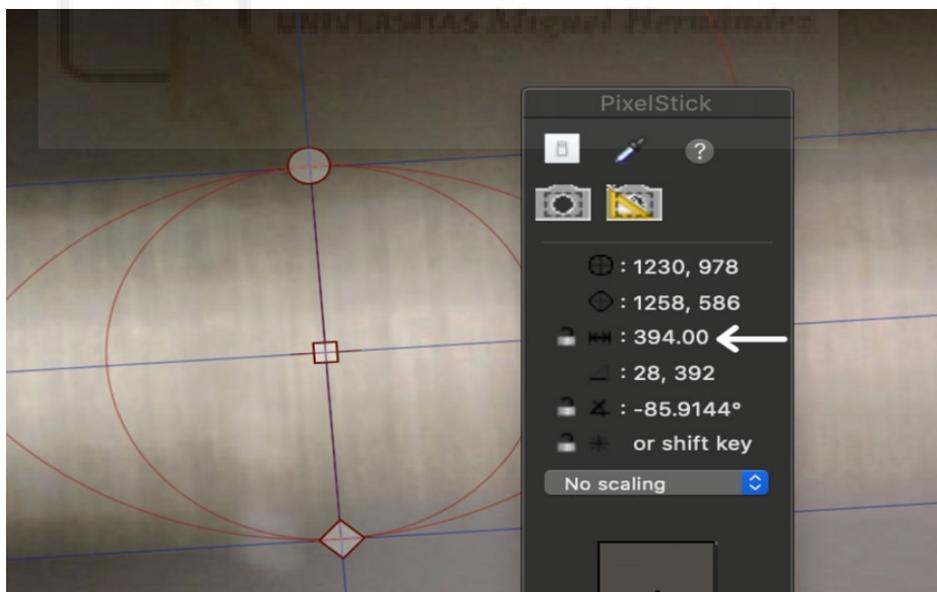


Figura 39. Imagen del piezo en vibración a 125Hz

Como en los dos casos anteriores, se ha calculado el desplazamiento. A 200 Hz, el “espesor” es de 1,39 mm, por lo que se ha desplazado 0,295 mm.

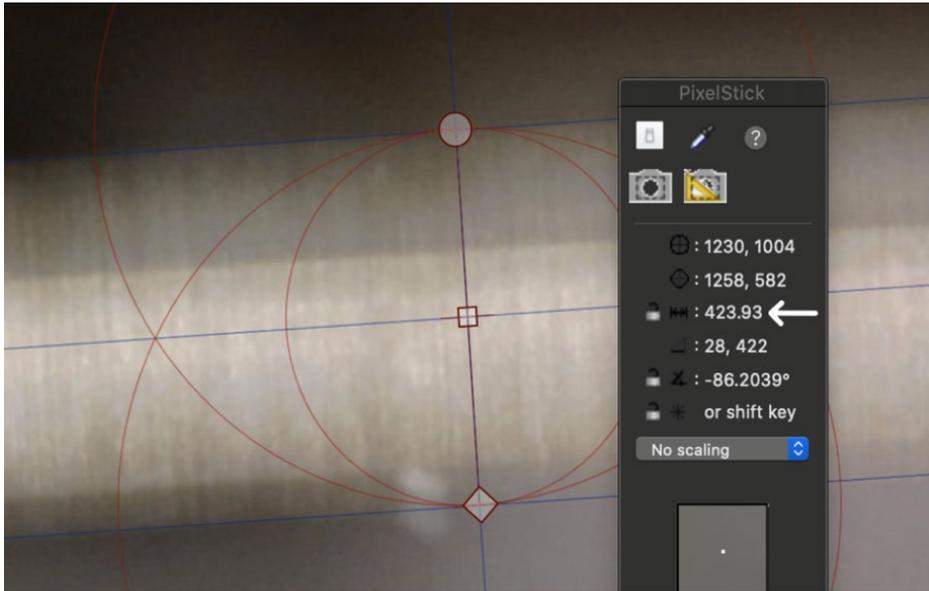


Figura 40. Imagen del piezo en vibración a 200Hz

A partir de 200 Hz, la señal de salida AC se saturaba. Esto es debido a que el operacional trabaja a muy bajas frecuencias.

En la siguiente figura, podemos ver una gráfica del desplazamiento en función de la frecuencia.

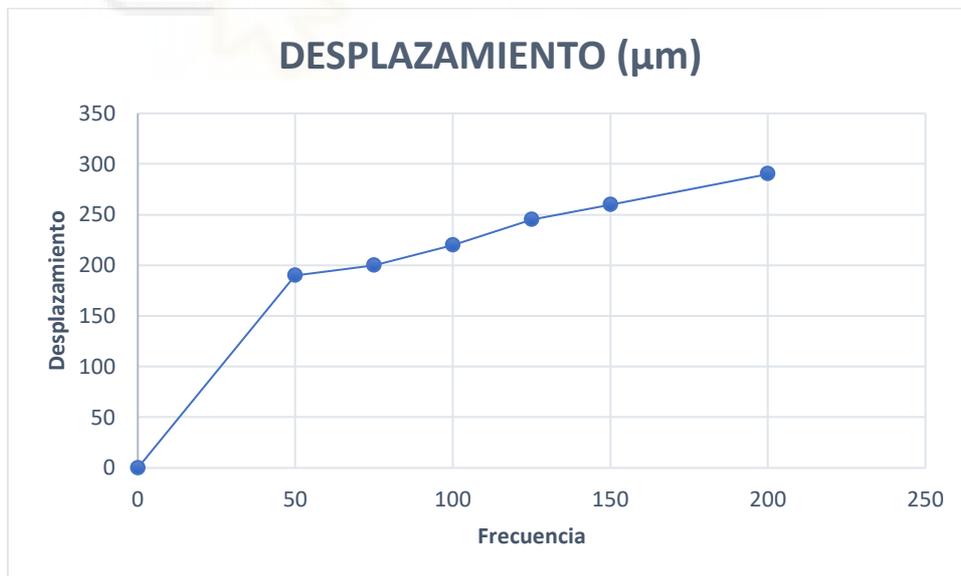


Figura 41. Desplazamiento del sensor piezoeléctrico en función de la frecuencia de trabajo.

Como se puede observar, una vez que empieza a desplazarse, el desplazamiento respecto a la frecuencia es casi lineal. Ya que el operacional a partir de 200 Hz empezaba a saturarse, por lo que no se ha conseguido un mayor desplazamiento.

4.3.2 MEDIDAS COMO TRANSDUCTOR MECANOELÉCTRICO

Todas las medidas anteriores se han realizado intentando seguir las instrucciones del fabricante, ya que el dispositivo ha sido diseñado para funcionar según esas instrucciones. Sin embargo, este piezoeléctrico no ha sido diseñado para utilizarlo como transductor electromecánico, aunque, al tener propiedades de la piezoelectricidad, se ha conseguido obtener tensión eléctrica a partir de una variación mecánica.

Para ello, se ha utilizado un motor DC (hasta 24 V) como generador, al que se le ha colocado un disco excéntrico unos milímetros al eje del motor para que el punto de contacto con el piezoeléctrico describa un movimiento oscilante. En el Anexo 6.4 se explica como sí describe un movimiento sinusoidal.

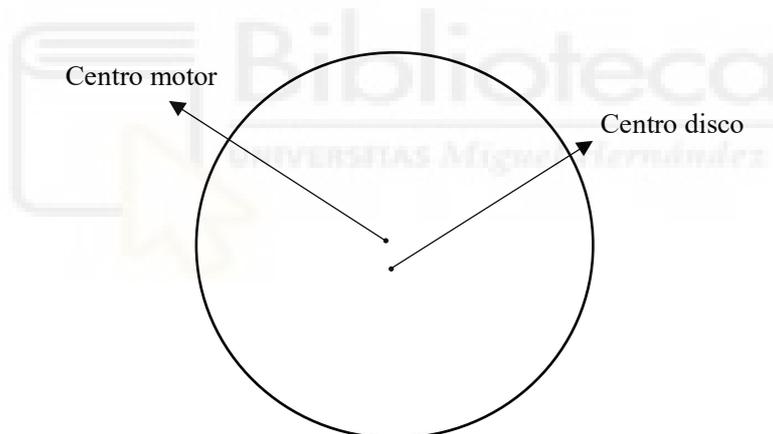


Figura 42. Comparación centro disco con centro del motor DC

La siguiente gráfica muestra cómo describe el punto de contacto un movimiento oscilatorio de tipo sinusoidal. Azul: desplazamiento del punto de contacto entre cantiléver, normalizado al radio del disco, para $d/R=0.1$. Rojo: función sinusoidal de la misma amplitud y periodo. El tiempo está normalizado al periodo de giro.

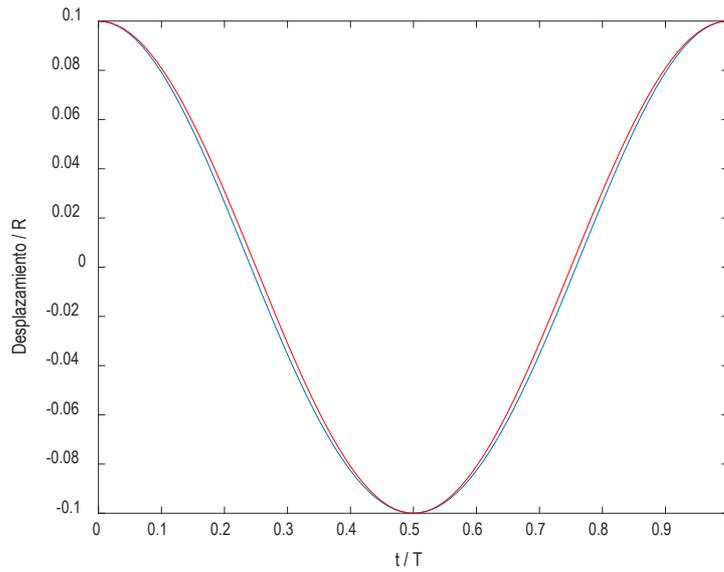


Figura 43. Función senoidal del desplazamiento del cantiléver (azul) y de una función senoidal normal de la misma amplitud y frecuencia (rojo).

Al sensor piezoeléctrico se le ha colocado una extensión ya que, por su naturaleza cerámica, es muy sensible a roturas. Por ello, las medidas que se van a tomar pueden mejorarse, ya que se puede desplazar aun más el piezo

Las siguientes imágenes muestran el montaje:

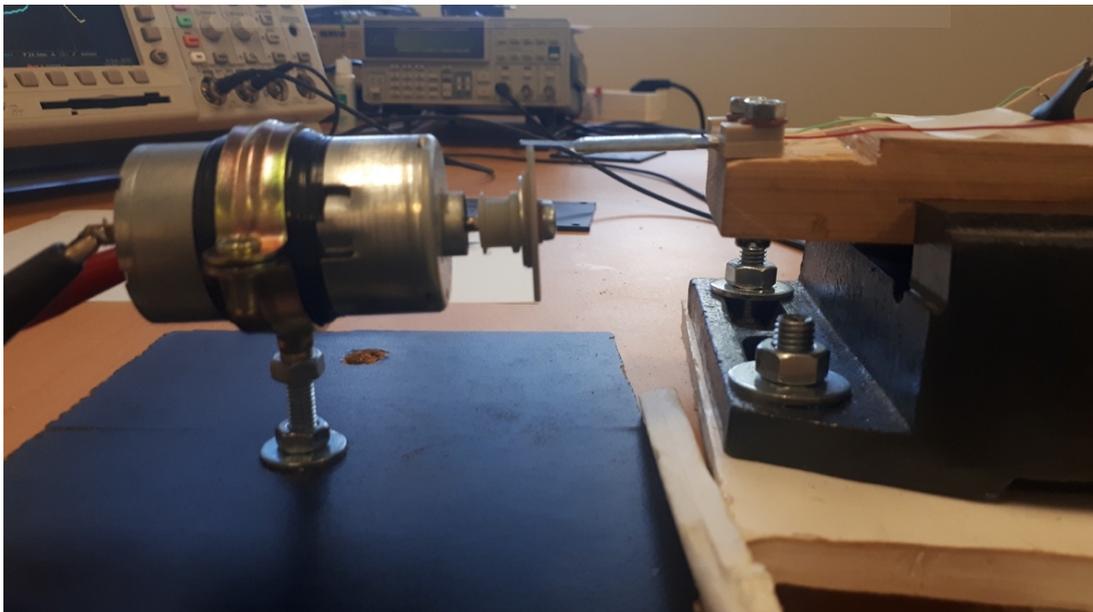


Figura 44. Vista perfil montaje motor DC, disco excéntrico y piezoeléctrico con extensión

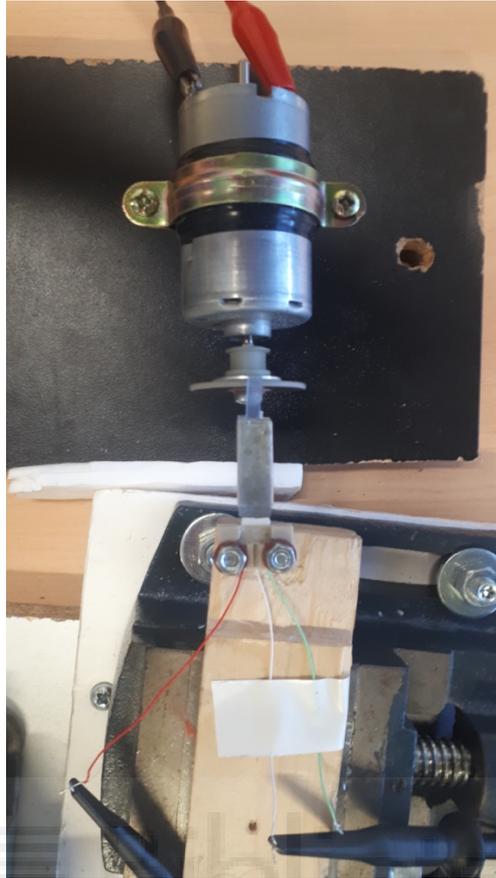


Figura 45. Vista alzado montaje motor DC, disco excéntrico y piezoeléctrico con extensión

Para ir obteniendo diferentes medidas respecto a la frecuencia, se va a ir incrementando la tensión de entrada del motor DC. Para ello, primero se han tomado los datos del motor DC en vacío, y se comprobará, si al colocar una carga, varía la frecuencia obtenida. Para obtener la frecuencia de oscilación del motor DC, se le ha colocado dos aspas metálicas que se hacen pasar entre dos bobinas. Cuando la parte metálica pasa entre las dos bobinas, éstas (que están conectadas al osciloscopio) detectan un cambio de flujo magnético respecto al tiempo. Con la ayuda del osciloscopio, se puede medir la frecuencia a la que giran las aspas.

TENSIÓN (V)	FRECUENCIA (Hz)
3	6,5
4	9,33
5	11,7
6	15
7	16,9
8	20,5
9	23
10	26
11	28,1
12	31,3
13	34,2

TENSIÓN (V)	FRECUENCIA (Hz)
14	36,5
15	40,3
16	43,1
17	47,2
18	49
19	52
20	54,3
21	56,2
22	60
23	62,5
24	65,8

Tabla 6. Relación tensión/frecuencia del motor DC sin carga

Esta relación de tensión-frecuencia, como ya se ha dicho es en el vacío, sin ninguna carga que pueda afectar a la velocidad de giro.

Una vez montados los dispositivos, se han realizado las medidas correspondientes. Como resultado, a la salida directa del piezoeléctrico, se han obtenido los siguientes resultados:

TENSION MOTOR (V)	CONSUMO MOTOR (mA)	FRECUENCIA MOTOR (Hz)	AMPLITUD (mv)	
			MAX.	MIN.
SALIDA PIEZO				
2	80	1,78	1010	650
3	79	4,81	940	750
4	77	7,53	980	710
5	77	10,10	930	760
6	78	12,8	890	750
7	80	15,4	1260	480
8	78	18,25	690	860

9	80	20,98	960	680
10	79	23,6	1330	430
11	80	26,42	930	670
12	81	29,13	880	760
13	81	32,27	1370	440
14	80	34,82	820	800
15	83	37,3	1110	530
16	86	38,1	1410	320
17	87	43,1	610	1090
18	88	45,8	1110	680
19	88	48,6	1380	700
20	89	51,1	1580	580
21	89	53,8	1440	1,02
22	86	56,8	1940	700
23	86	59,5	1280	940
24	88	61,7	1720	400
25	87	65,1	840	1440

Tabla 7. Datos obtenidos a la salida del piezo respecto a la vibración generada por el motor DC.

Como podemos ver en la siguiente gráfica, al colocar una carga en el motor (se coloca el disco y hace que éste roce levemente en el plástico adherido al piezoeléctrico), haciendo que la frecuencia disminuya levemente. Esta disminución de frecuencia, como se puede observar es lineal y no influye en el comportamiento del motor DC.

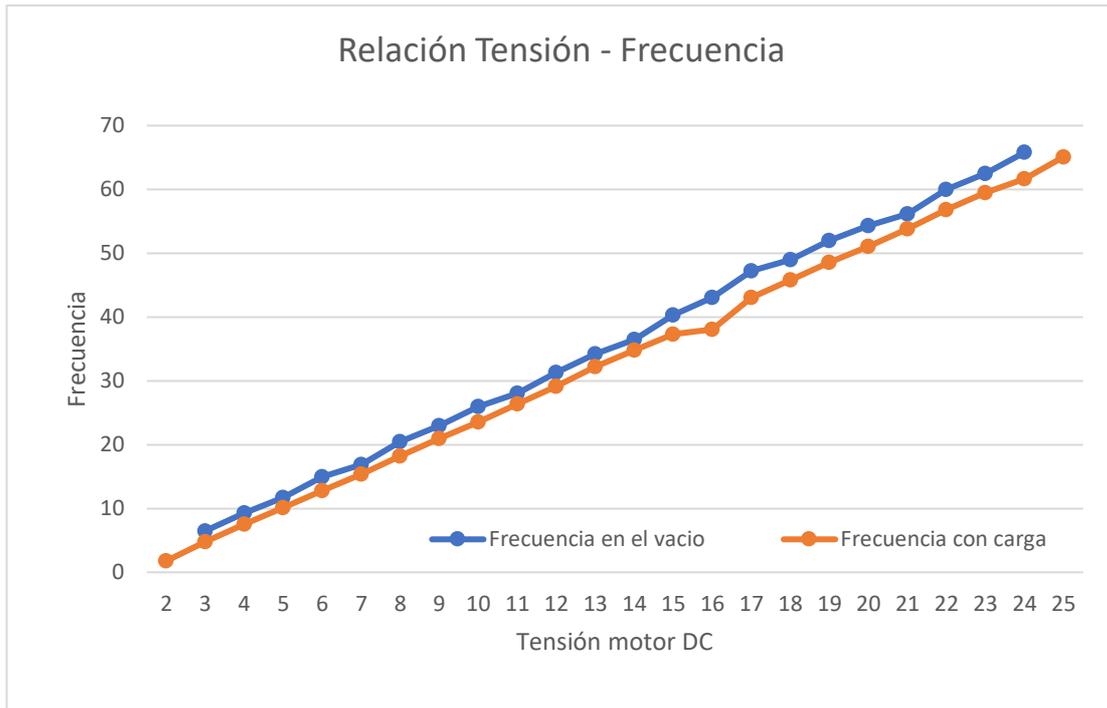


Figura 46. Relación tensión-frecuencia Motor DC con y sin carga.

A su vez, la siguiente gráfica muestra el resultado de la tensión de salida obtenida respecto de la tensión de entrada del motor DC.

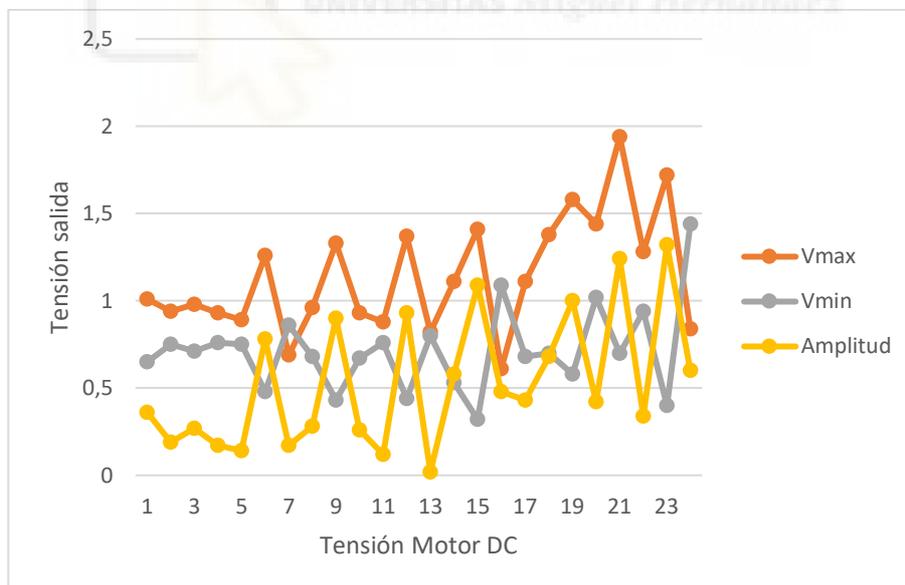


Figura 47. Relación tensión de salida respecto tensión motor DC

Aunque todas las medidas están realizadas cuando el disco excéntrico desplaza levemente el plástico adherido al piezoeléctrico para no dañar éste, observando las gráficas vemos que se obtiene mayor tensión y amplitud sobre los 20 V aplicados al motor DC, que ofrece

a esta tensión una frecuencia de unos 50 Hz. A 22 V, se obtiene una tensión máxima de 2V y una tensión mínima de 700 mV de la señal alterna generada por el piezoeléctrico. Estas tensiones son relativamente bajas, ya que, como se ha comentado, se desplaza levemente el piezo para no dañarlo. A medida que se acerca el piezoeléctrico al disco, el sensor empezará a tener un mayor desplazamiento, obteniéndose una mayor tensión.

4.4 CIRCUITO ACONDICIONADOR

Para poder utilizar la tensión obtenida por el piezo, conectamos la salida de éste a un circuito acondicionador. El circuito acondicionador elegido es el LTC3588-1, que consta de un rectificador de onda completa y un convertor reductor buck.

El LTC3588-1 consta de 11 pines, como se puede ver en la imagen 48. Estos pines se conectan a una serie de resistencias, condensadores y una bobina, como se puede ver en la figura 49, para que, teniendo una tensión alterna adecuada entre las entradas PZ1 y PZ2, conseguir una tensión continua estable en la salida Vout. Por ejemplo, si entre las entradas, la tensión alterna alcanza $4 V_{pp}$, en la salida podemos conseguir 3 V de continua y estable, tal como se muestra en la figura 50.

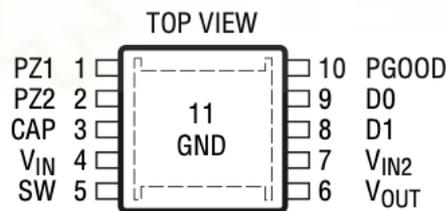


Figura 48. Configuración pines LTC3588-1

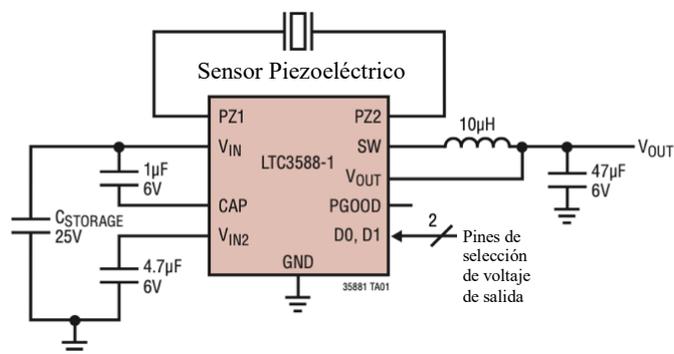


Figura 49. Esquemático del circuito acondicionador LTC3588-1

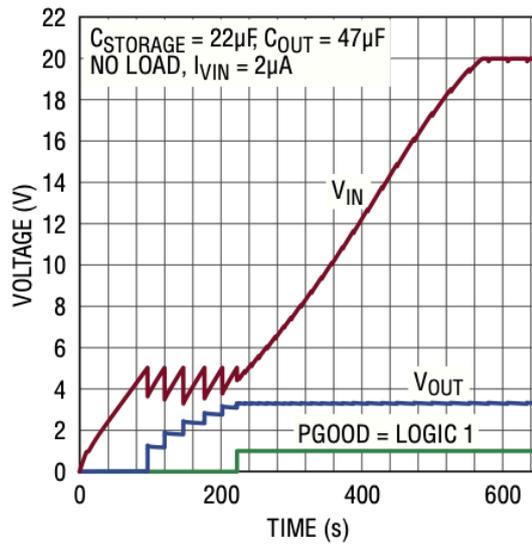


Figura 50. Tensión de salida según tensión de entrada

Internamente, el LTC3588-1 tiene el siguiente diagrama de bloques (figura 51). Como se puede ver, la entrada de la señal del piezoeléctrico pasa por un puente de diodos para estabilizar la señal alterna. Cuando la demanda de corriente a la salida es baja, el convertidor almacena carga en el condensador $C_{storage}$. Esta carga se transfiere a la salida cuando aumenta la demanda de corriente.

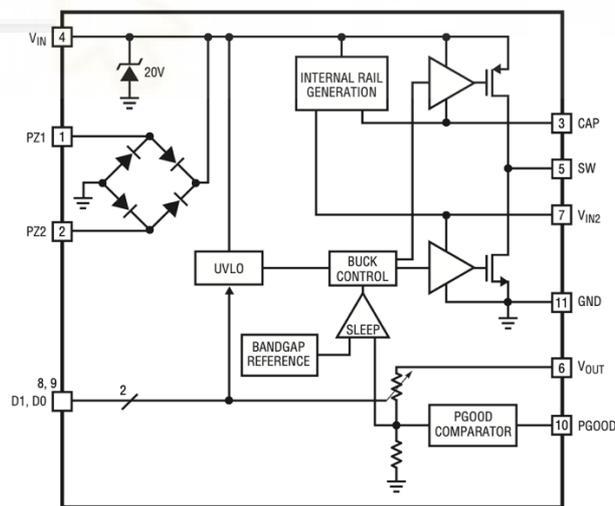


Figura 51. Diagrama de bloques interno

Para usar este dispositivo, se ha diseñado una placa PCB que muestra la figura 52 para poder conectar la salida del piezoeléctrico a la entrada del circuito acondicionador.

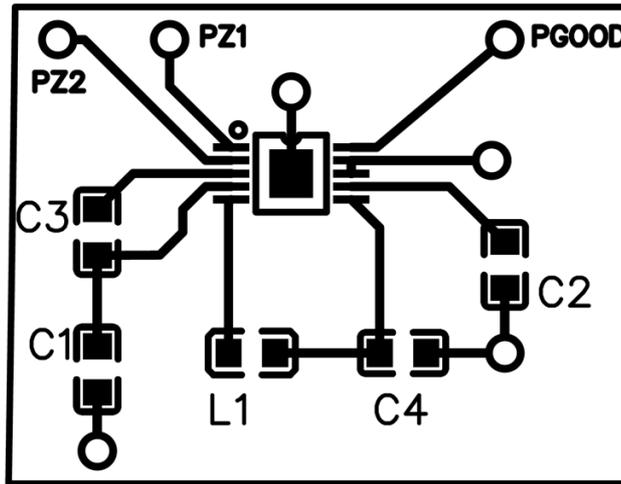


Figura 52. Diseño PCB con software Easy Eda.

Finalmente, una vez soldados los componentes, las entradas y la salida, el circuito físico final quedaría:

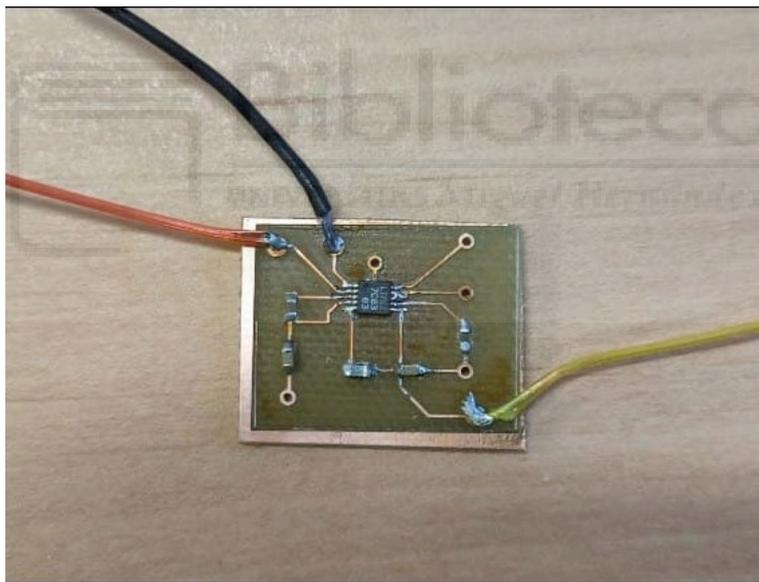


Figura 53. Placa PCB impresa con los componentes soldados

Tal como indica la tabla X, el chip LTC-3358-1 tiene cuatro configuraciones, según como estén conectados los pines D0 y D1. En el diseño en PCB, se han conectado estos dos pines a masa, por lo que a la salida obtendremos, si se llega a activar, una tensión de 1,8 V (como se ve en la figura 54). Para conseguir las otras tres configuraciones, se diseña una nueva placa PCB para poder conectarla a una placa board y hacer los cambios oportunos. Que esté a 0 es que está conectado a masa, y que un pin esté a 1, es que está conectado a V_{in_2} .

D_0	D_1	V_{OUT} (V)
0	0	1.8
1	0	2.5
0	1	3.25
1	1	3.6

Tabla 8. Salida V_{OUT} según conexiones D_0 y D_1

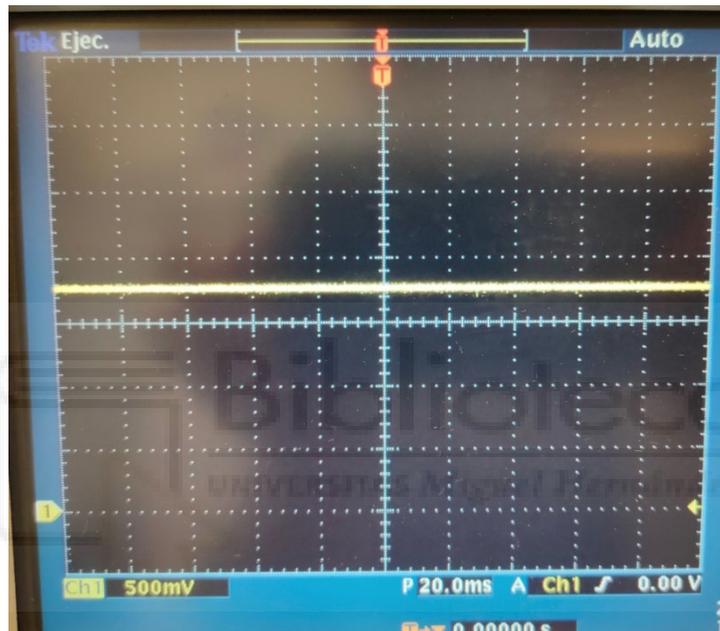


Figura 54. Salida V_{OUT} a 1.8 V.

4.5 MEDIDAS COMO GENERADOR

Todas las medidas del apartado 3.3 están realizadas cuando el disco excéntrico desplaza levemente el plástico adherido al piezoeléctrico. Esto hace que el piezo no se desplace lo suficiente y que las tensiones obtenidas no sean muy elevadas. Cuando se empieza a acercar el disco al piezo, se observa que la tensión de salida aumenta hasta pasar los 3V. Al querer acercarlo un poco más para conseguir la mayor tensión posible, el sensor piezoeléctrico quebró, por lo que no se realizaron más medidas con este tipo de sensor. Al ser un piezoeléctrico relativamente caro, se decide no volver a comprar.

Para las nuevas pruebas, se va a utilizar un disco cerámico como transductor piezoeléctrico (figura 55).

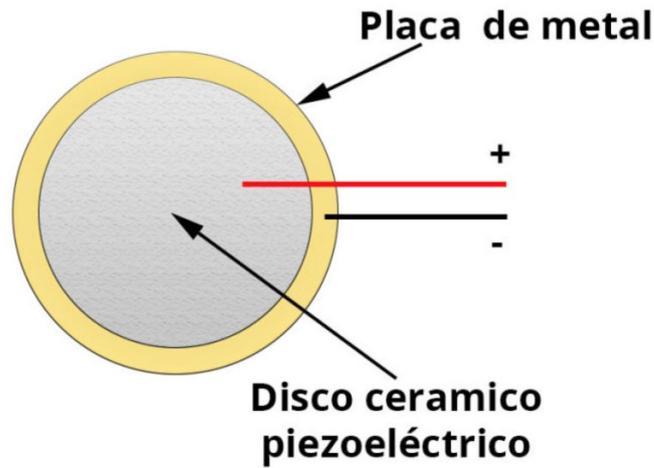


Figura 55. Disco cerámico piezoeléctrico

Más concretamente, el disco utilizado es el 7BB-41-2L0 de la empresa Murata. Este piezoeléctrico tiene las siguientes dimensiones y características:

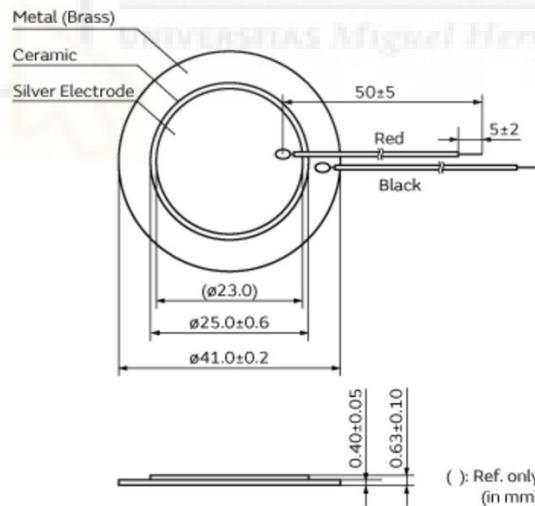


Figura 56. Dimensiones disco piezoeléctrico 7BB-41-2L0

Dimensiones: Diámetro “electrodo”: 23 mm, Diámetro cerámica: 25 ± 0.6 mm, Diámetro metal: 41 ± 0.2 mm

Frecuencia de resonancia: 2.2 kHz

Capacidad: 30 nF

Para generar las vibraciones, se seguirá usando el mismo montaje, con el motor DC y el disco excéntrico al eje que gira, para crear un movimiento ondulatorio. Para proteger al disco cerámico se le adhiere en la parte superior un disco de dimensiones similares de sustrato FR4 (figura 57). El motor DC estará conectado a 15V, donde aproximadamente gira a una frecuencia de 40 Hz.

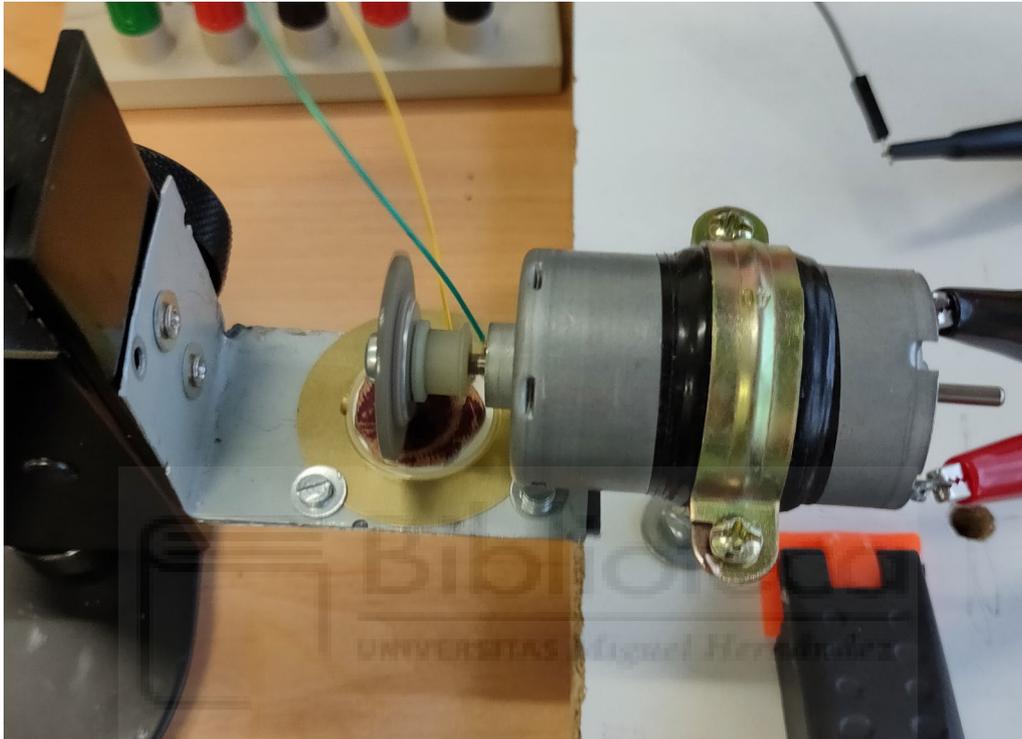


Figura 57. Montaje disco cerámico con motor DC.

Para comprobar la tensión eléctrica que es capaz de ofrecer el disco piezoeléctrico a partir de las vibraciones, se conecta la salida del disco cerámico a la entrada 1 del osciloscopio. Como resultado, obtenemos una señal errática pero periódica con una tensión de unos 11 V_{pp} (figura 58). La señal obtenida no llega a ser sinusoidal ya que la presión ejercida por el disco excéntrico actúa sobre una pequeña parte del material de protección. Además, la base sobre la que está sujeto el disco cerámico, y el montaje, a pesar de estar bien sujeto, también vibran. Si sobre el disco cerámico, de forma manual ejercemos presión con la mano, se obtiene una señal más parecida a una señal sinusoidal, como se muestra en la figura 59.

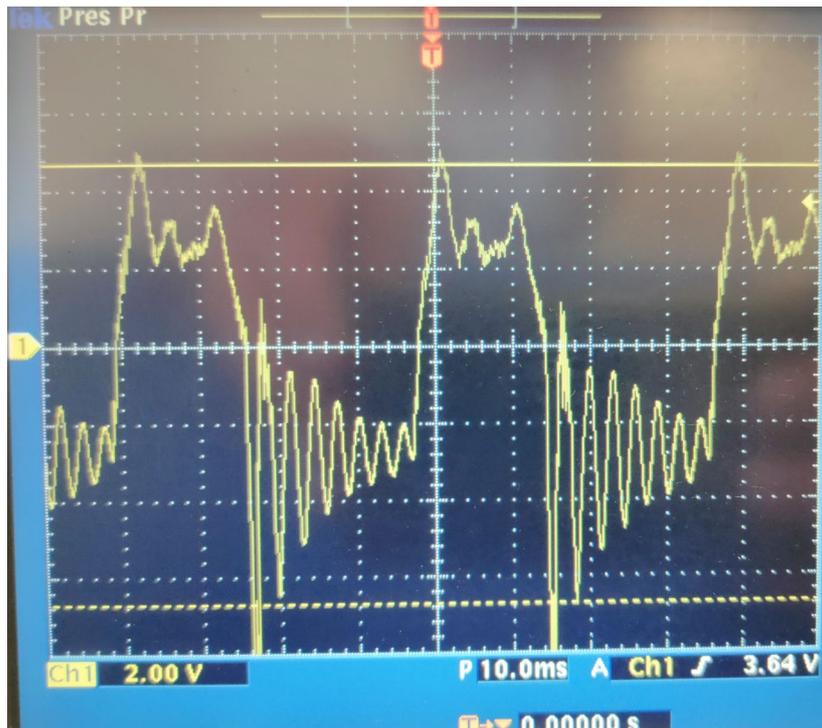


Figura 58. Tensión obtenida a través de la excitación del motor DC/DC

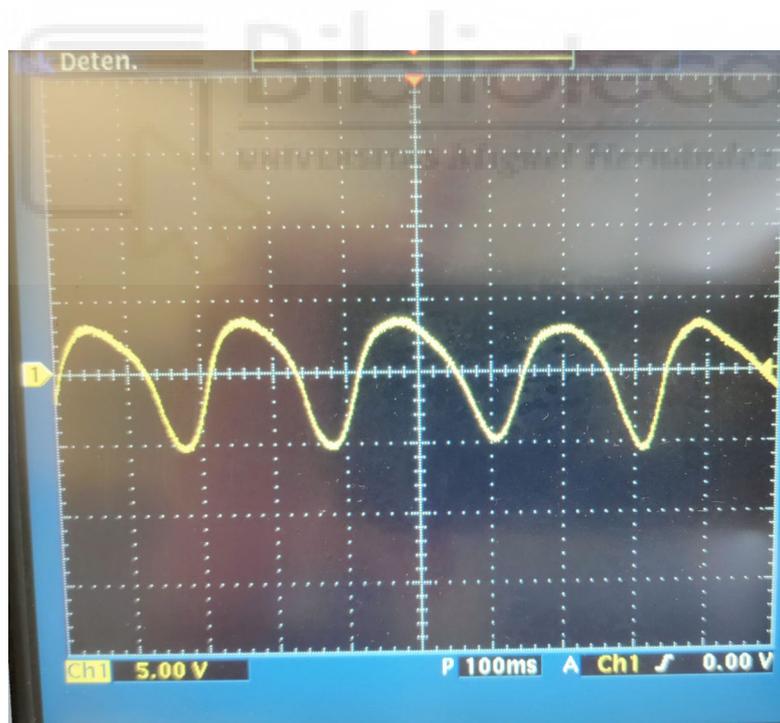


Figura 59. Tensión obtenida a través de pulsaciones con la mano

Tras comprobar que la salida del disco piezoeléctrico ofrece una tensión considerable para activar el circuito acondicionador, se conecta ésta a la entrada del circuito acondicionador y a la entrada 2 del osciloscopio (azul). La salida del circuito

acondicionador se conecta a la entrada 1 del osciloscopio (amarillo). Como resultado, vemos que el circuito acondicionador llega a activarse (figura 60)

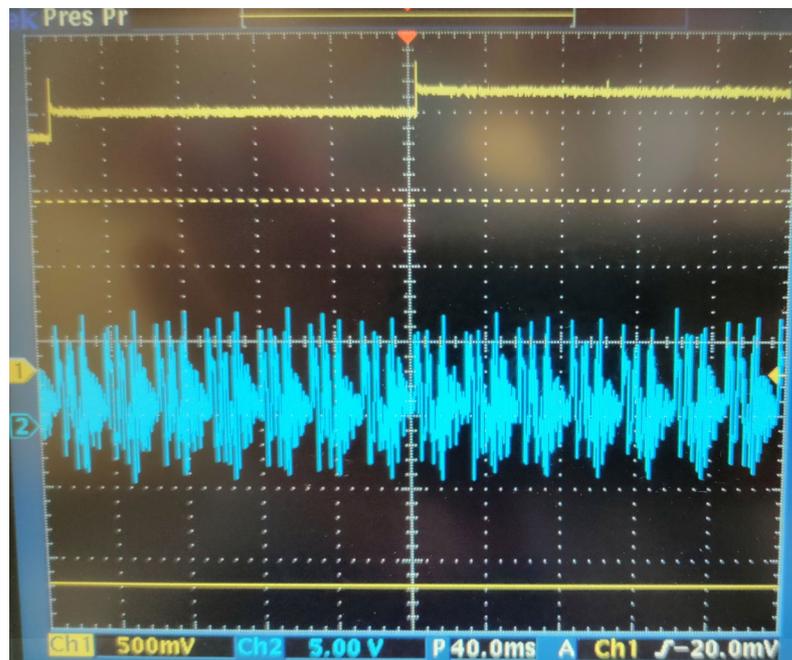


Figura 60. Circuito acondicionador activado

Al comprobar que a la salida del circuito acondicionador tenemos tensión continua de unos 1.8 V, se conecta la salida también a un LED con una resistencia de 100 Ω . Como resultado, vemos que el LED llega a encenderse como se puede observar en la figura 61.

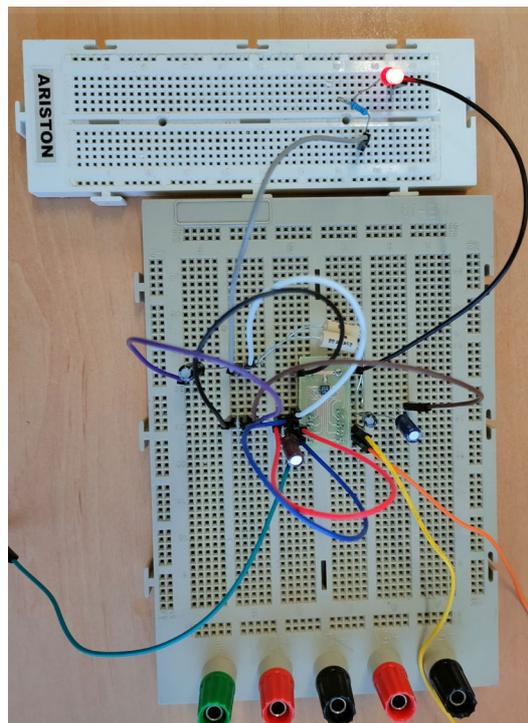


Figura 61. Activación del led

Se comprueba que el LED se enciende, pero llega a parpadear. Se sustituye el propio LED por una resistencia de 100 k Ω . Al poner esta carga, se comprueba que el led parpadeaba porque el circuito acondicionador no llega a mantener la tensión totalmente estable, como se puede observar en la siguiente imagen:

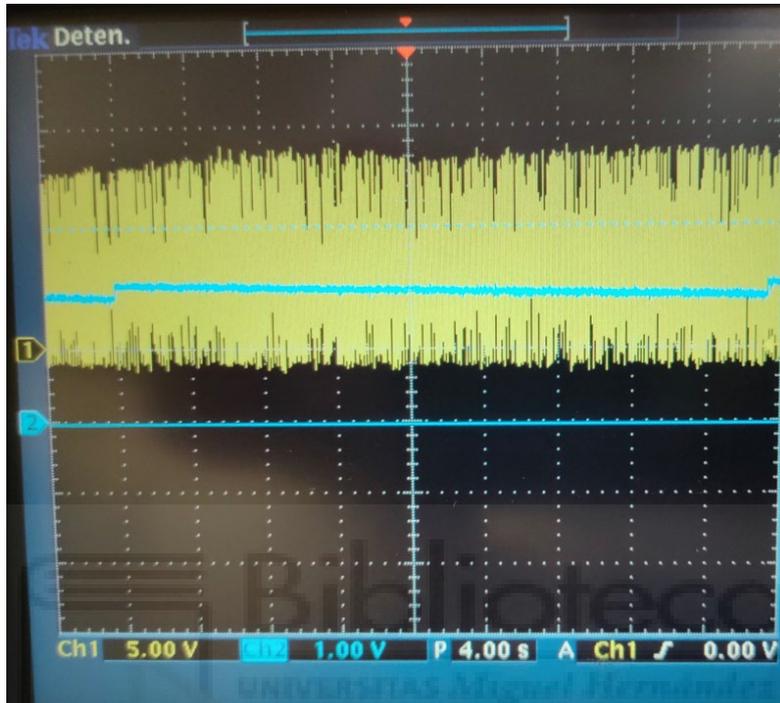


Figura 62. Leve caída de tensión a través de la carga.

En la figura 62, vemos como llega a caer levemente la tensión, aunque vuelve a recuperarla. Al disminuir la tensión, la corriente aumenta ya que la carga sigue siendo la misma, por lo que al llegar a una tensión mínima (1,7 V), el circuito acondicionador vuelve a ofrecer los 1,8 V.

Una vez se ha comprobado que el disco piezoeléctrico es capaz de activar el circuito acondicionador, se va a comprobar hasta cuanta corriente es capaz de suministrar antes de que el circuito no sea capaz de suministrar la tensión correspondiente.

Se empieza midiendo en circuito abierto, donde la resistencia es la propia de entrada del osciloscopio (1 M Ω). Como se puede observar en la figura 63, el circuito se activa sin ningún problema, ofreciendo 1,8 V de media.

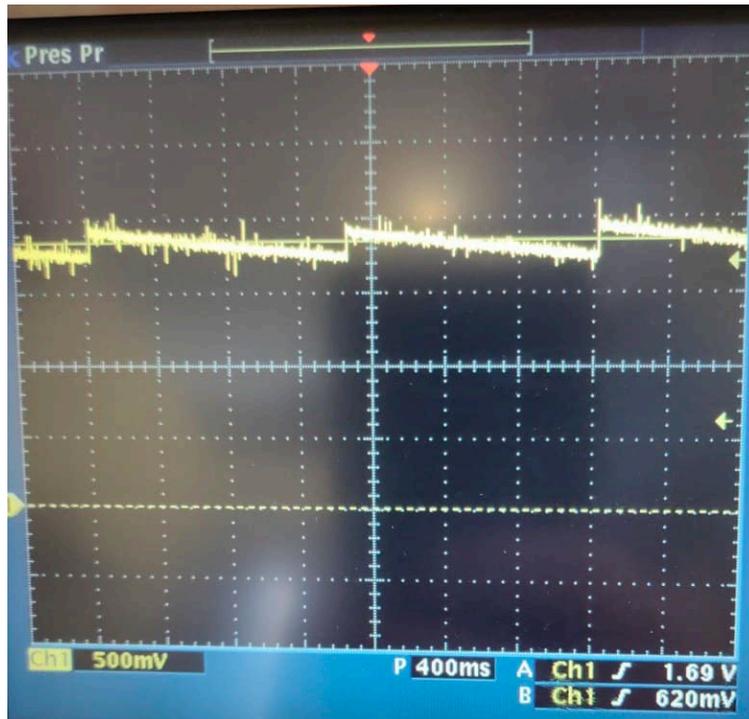


Figura 63. Medida en abierto

Para comprobar la corriente máxima que puede ofrecer, se empieza colocando cargas de resistencia alta y luego ir disminuyéndola hasta que el circuito acondicionador no sea capaz de activarse. Se empieza con una carga de $330\text{ k}\Omega$, que, al conectar al osciloscopio, se conecta en paralelo a la resistencia interna del propio osciloscopio, por lo que la resistencia total sería de $250\text{ k}\Omega$. Con esta carga, el circuito se activa si ningún problema. Se sigue disminuyendo la carga hasta llegar sobre los $14\text{ k}\Omega$. Poniendo una carga de $15\text{ k}\Omega$, que serían $14,7\text{ k}\Omega$ al estar en paralelo con la resistencia de $1\text{ M}\Omega$, el circuito llega a ofrecer los 1.8 V de salida, como se ve en la figura 64.

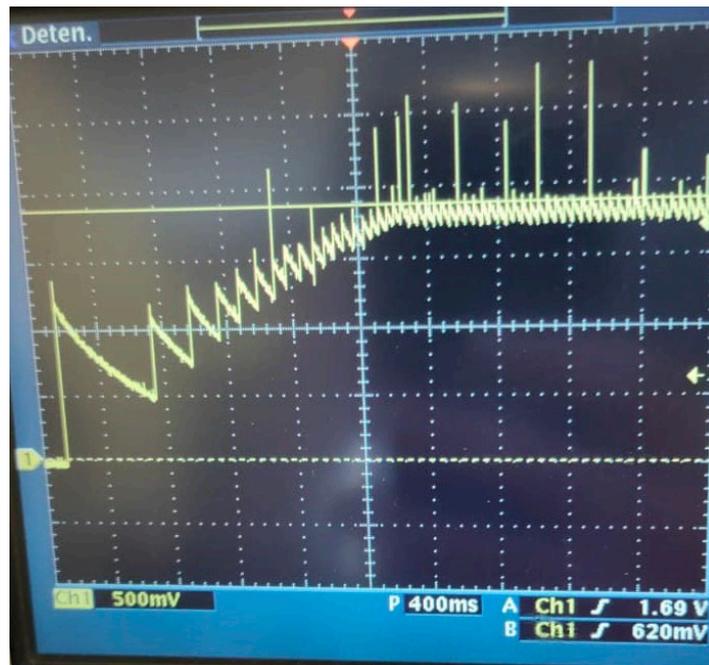


Figura 64. Medida con carga de 14,7 k Ω

Por debajo de esta resistencia, el circuito no llega a activarse y ya no ofrece los 1,8 V, como se puede ver en la figura 65.

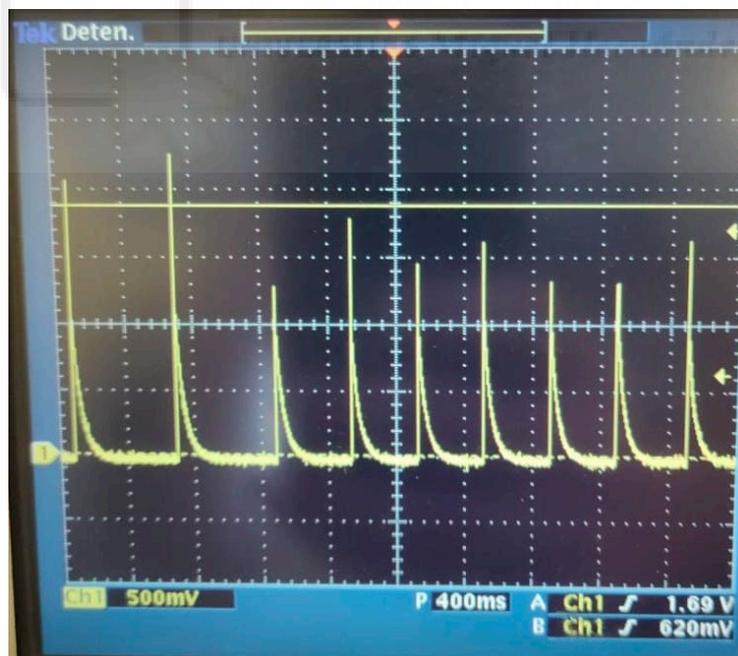


Figura 65. No activación del circuito acondicionador.

Una vez comprobado hasta que carga es capaz de ofrecer corriente, se puede afirmar que la intensidad máxima que es capaz de suministrar es de 125 μ A para una carga de 14,7 k Ω . Para esta corriente y una tensión media de 1,84 V, el sistema es capaz de ofrecer 230

μW de potencia. Por otro lado, la mínima intensidad que es capaz de ofrecer es en circuito abierto (con la resistencia de $1\text{ M}\Omega$ de la entrada del osciloscopio) es de $1,84\ \mu\text{A}$.



5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este trabajo, se han realizado una serie de medidas experimentales con dispositivos piezoeléctricos en dos configuraciones geométricas, con el objetivo de convertir energía mecánica (de las vibraciones) en energía eléctrica. Este objetivo se ha cumplido con una configuración geométrica, y se ha conseguido sacar una tensión y corriente suficientes como para encender un led. La configuración con la que se ha conseguido encender el led a sido con el disco cerámico, que sería una configuración tipo pila o stack. La corriente máxima que se a conseguido medir es de 125 μA (siendo la potencia máxima de 230 μW). Es una intensidad relativamente baja, pero se ha conseguido con un transductor que no está diseñado para el uso que se le ha dado. Además, si se le añaden otros transductores en paralelo, la intensidad aumentaría. Solo se ha conseguido activar el circuito acondicionador con el disco cerámico, ya que se han comprobado las limitaciones de la configuración cantiléver debido a la fragilidad de los materiales cerámicos. En el circuito acondicionador se han probado varias configuraciones para conseguir varias tensiones de salida estables.

Este proyecto se ha centrado en demostrar que se puede aprovechar las vibraciones y convertirlas en energía eléctrica para poder encender un simple led. Las expectativas se han cumplido, sin embargo, tiene un amplio abanico de mejoras, las cuales abren una ventana a una serie de proyectos específicos:

Se pueden estudiar otras configuraciones de transductores piezoeléctricos (tipo címbalo, tipo concha...).

Se puede estudiar la posibilidad de colocar en serie o en paralelo varios transductores piezoeléctricos y comprobar la tensión y corriente obtenida.

Se puede estudiar de forma teórica el diseño de un transductor piezoeléctrico.

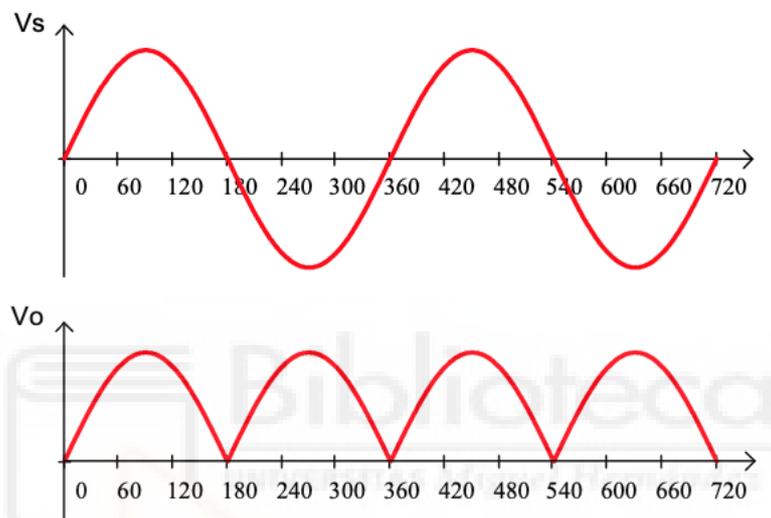
Se puede diseñar un circuito acondicionador para obtener una tensión específica a la salida.

Esta es una tecnología que está en auge, por lo que la continua investigación y experimentación serán claves para que a medio plazo se pueda empezar a implementar.

6. ANEXOS

6.1 PUENTE RECTIFICADOR DE DIODOS

En las siguientes imágenes, podemos ver la señal de tensión de salida y la tensión de entrada.

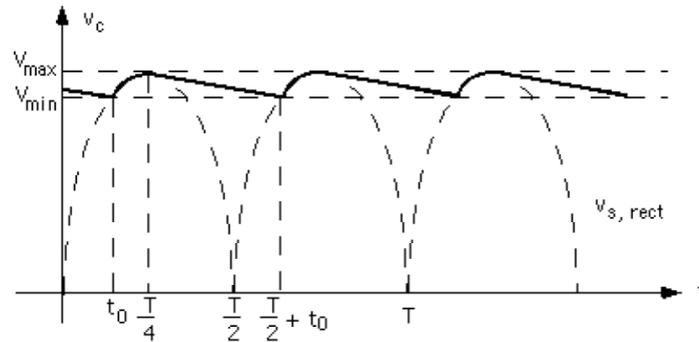


En este caso, el valor medio del voltaje de salida es:

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} V_s dt = \frac{1}{T/2} \int_{\langle T/2 \rangle} V_s dt = \\ \bar{V} &= \frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_{max} \sin wt \, dwt = \\ \bar{V} &= \frac{2\sqrt{2} V_{max}}{2\pi} [-\cos wt]_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2} V_{max}}{2\pi} [-\cos(\pi) - (-\cos 0)] = \\ \bar{V} &= \frac{2\sqrt{2}}{2\pi} V_{max} (1 + 1) \\ \bar{V} &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{max}\end{aligned}$$

Después de atravesar el puente de diodos, la señal necesariamente tiene que pasar por un condensador de rizado para estabilizarla.

Tras pasar la señal por el condensador de rizado para estabilizarla, ésta pasa a ser lo más parecido a una señal con tensión continua. Cuanto mayor sea la capacidad del condensador, más plana será la descarga y se parecerá más a una señal continua.

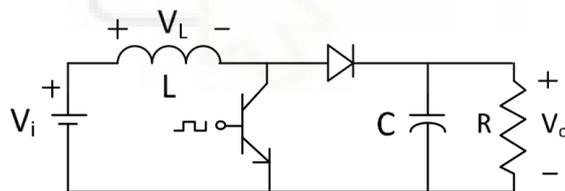


Tensión de salida al pasar por el condensador de rizado.

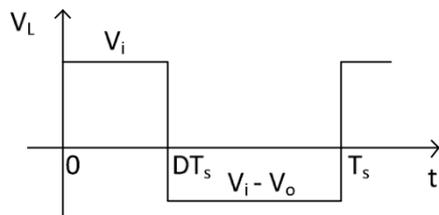
6.2 CONVERTIDORES DC/DC

CONVERSOR ELEVADOR (BOOST)

El esquemático de este convertidor sería:



Y el ciclo de trabajo:



Para $0 \leq t \leq DT_s$ el transistor está en saturación y el diodo no conduce, por lo que la fuente suministra energía al inductor.

Para $DT_s \leq t \leq T_s$ el transistor está en corte y el diodo está en ON.

Al estar en un circuito sin pérdidas, es decir, en régimen permanente, ambos rectángulos deben ser iguales, por lo que ambas áreas deben ser iguales:

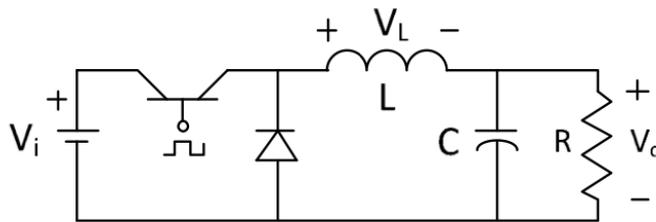
$$V_i D T_s = -(V_i - V_o) T_s (1 - D)$$

$$V_i D = -V_i + V_i D + V_o - V_o D$$

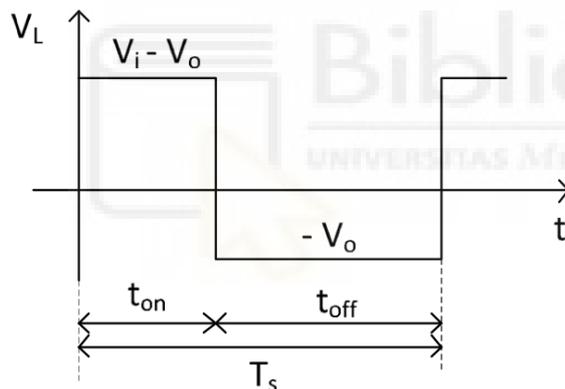
$$V_o = \frac{V_i}{1 - D}$$

CONVERSION REDUCTOR (BUCK)

En este caso, el esquemático del circuito sería:



Y el ciclo de trabajo:



Para $0 \leq t \leq DT_s$ el transistor está en saturación y el diodo no conduce (off).

Para $DT_s \leq t \leq T_s$ el transistor está en corte y el diodo conduce (on).

Al estar en régimen permanente (sin pérdidas), ambos rectángulos tienen que ser iguales, por lo que, al igual que antes, ambas áreas tienen que ser iguales:

$$(V_i - V_o) D T_s = V_o (1 - D) T_s$$

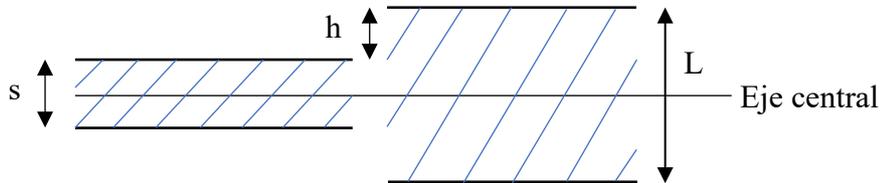
$$(V_i - V_o) D = V_o (1 - D)$$

$$V_i D - V_o D = V_o - V_o D$$

$$V_o = V_i D$$

6.3 DESPLAZAMIENTO SENSOR PIEZOELÉCTRICO

Para entender mejor como se calcula cuanto ha desplazado el sensor piezoeléctrico, se muestra la siguiente imagen:



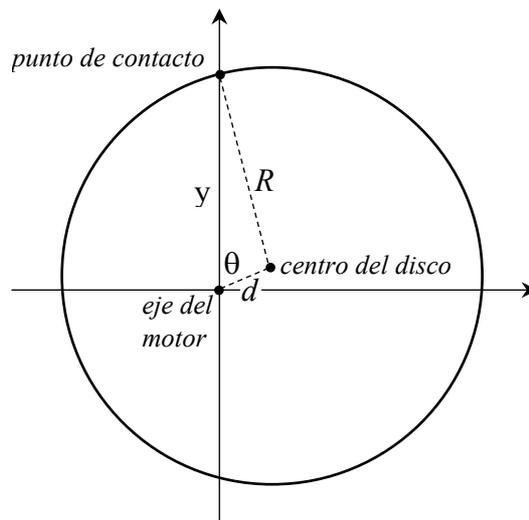
Donde s es el espesor inicial del piezoeléctrico, L es el espesor final que adquiere el piezoeléctrico cuando se estimula eléctricamente, y h es el desplazamiento realizado por sensor. Por lo que, podemos afirmar que:

$$s + 2h = L$$

$$h = \frac{L - s}{2}$$

6.4 POSICION DEL PUNTO DE CONTACTO DEL DISCO CON LOS TRANSDUCTORES.

La geometría del problema es la que muestra la figura. El ángulo de giro es $\theta = \omega t$.



Aplicando el teorema del coseno al triángulo de lados d , R e y resulta:

$$R^2 = d^2 + y^2 - 2ydcos\theta$$

Resolviendo la ecuación en y obtenemos:

$$y = d\cos\theta \pm \sqrt{R^2 - d^2\sin^2\theta}$$

La solución $+$ representa el punto de contacto superior, que es el que nos interesa. Para pequeños valores de la separación d entre el eje del motor y el eje del disco, podemos desarrollar por Taylor la raíz, resultando

$$y = R + d\cos\theta - \frac{d^2\sin^2\theta}{2R}$$

El tercer sumando es una corrección pequeña al movimiento puramente sinusoidal para valores pequeños de d frente a R .



7. BIBLIOGRAFIA

- [1] https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?cid=GPDes_28&locations=ES
- [2] S. O. Reza Moheimani, A. J. Fleming, (2006) Fundamentals of Piezoelectricity. In: Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping, 9-35. Advances in Industrial Control. Springer, London
- [3] https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt_mat_n3.pdf
- [4] R. Calì et al., Piezoelectric Energy Harvesting Solutions, *Sensors* 14 (2014) 4755-4790; doi:10.3390/s140304755.
- [5] <http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf>
- [6] <http://www.nano.df.uba.ar/wordpress/wp-content/uploads/Piezoelectricidad.pdf>
- [7] Energy Harvesting Technologies, S. Priya, D. J. Inman ed., 2009, Springer.
- [8] Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications: Duck Run – APC International Ltd.
- [9] Waste energy harvesting, mechanical and thermal energies: Ling Bing, K., Li, T., Hng, H.H., Boey, F., Zhang, T., Li, S. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- [10] Kim, H. S., Kim, J.-H., & Kim, J. (2011). A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1129–1141.
- [11] S. Lee, R. E. Newnham, N. B. Smith, Short Ultrasound Exposure Times for Noninvasive Insulin Delivery in Rats Using the Light Weight Cymbal Array, IEEE

Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 51(2004)176-180.
doi:10.1109/TUFFC.2004.1320765

[12] <https://www.powerelectronicstips.com/frequently-asked-questions-piezoelectric-motors-part-1-actuators-faq/>

[13] R. Sanhueza, R. Guirriman, Electrónica de potencia. Universidad de Tarapaca, Chile. 2014

[14] Cristina Valiente Espí, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CARGADOR DE BATERÍA PARA DISPOSITIVOS ALIMENTADOS POR USB, TRABAJO FINAL DE GRADO, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, 2017.

[15] Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia dc/dc tipo boost, Revista de la Facultad de Ingeniería. Año 12. n.º 24, julio-diciembre de 2011, Colombia.

[16] <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/convertidor-boost-con-circuito-integrado-555/>

[17] <https://blog.ferrovial.com/es/2016/11/generar-electricidad-con-coches/>

[18] <https://newatlas.com/piezoelectric-road-harvests-traffic-energy-to-generate-electricity/10568/>

[19] Orrego, S., Shoele, K., Ruas, A., Doran, K., Caggiano, B., Mittal, R., & Kang, S. H. (2017). Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. Applied Energy, 194, 212–222

[20] <https://omicro.no.espanol.com/2015/03/la-banderas-piezoelectricas-seran-los-nuevos-molinos-de-viento/>

[21] F. C. Pimentel Ulhôa, P. A. A. Magalhães, R. A. de Souza Floriano and V. N. Coutinho, "Electric power generation with piezoelectricity for cargo ships," 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2017, pp. 1-8, doi: 10.1109/EVER.2017.7935884.

[22] N.V. Viet, X.D. Xie, K.M. Liew, N. Banthia, Q. Wang, Energy harvesting from ocean waves by a floating energy harvester, *Energy* 112 (2016) 1219-1226

[23]<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12581/Gonzalez%20Diaz%20Mario.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[24]<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.928.6678&rep=rep1&type=pdf>

