

Sensores piezoeléctricos y piezorresistivos: caracterización, fundamentos estructurales y potencialidades de aplicación

Piezoelectric and Piezoresistive Sensors: Characterization, Structural Fundamentals, and Application Potential

RAFAEL LEONARDO JIMÉNEZ ÁLVAREZ

Maestro en Administración Financiera

Docente-investigador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Universidad Católica de El Salvador, El Salvador

Email: rafael.jimenez@catolica.edu.sv

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7530-5250>

Fecha de recepción: 27-11-2024

Fecha de aceptación: 04-02-2025

Resumen

En estudios previos se realizó una caracterización de los diferentes tipos de sensores, partiendo del principio de transducción y de la magnitud medida. En continuidad con la temática, se decidió abordar de forma específica y particular los sensores piezorresistivos y piezoeléctricos, que tienen un mismo punto de partida —el efecto piezo— pero que ofrecen diferentes posibilidades de construcción y potencialidades de uso.

Haciendo una revisión bibliográfica rigurosa en fuentes científicas, se muestran las aplicaciones más comunes y sobresalientes de los sensores piezo, el funcionamiento de los mismos en diferentes situaciones y su respuesta ante distintas fuerzas a las que se pueden someter, así como las razones por las que se utilizan debido a su gran capacidad para entregar medidas fiables.

Se presenta, para el cierre, una interesante propuesta de continuidad, profundizando en la aplicabilidad y utilización de los sensores piezoeléctricos en la generación de energía, un uso que acapara atención por parte de la comunidad científica y que resultaría importante ampliar en futuros estudios

Palabras clave: Sensores piezoeléctricos, sensores piezorresistivos, transducción electromecánica, aplicaciones industriales, presión, deformación.

Abstract

Previous studies conducted a characterization of different types of sensors, based on the transduction principle and the measured quantity. Continuing this topic, the focus was placed specifically on piezoresistive and piezoelectric sensors, which share the same starting point —the piezoelectric effect— but offer different construction possibilities and application potential.

Through a rigorous bibliographic review of scientific sources, the most common and notable applications of piezo sensors are presented, along with their operation under various conditions and their response to different applied forces, as well as the reasons for their widespread use due to their high capacity for delivering reliable measurements.

Finally, an interesting proposal for further research is presented, focusing on the applicability and use of piezoelectric sensors in energy generation, a field that has attracted significant attention from the scientific community and warrants further exploration in future studies.

Keywords: Piezoelectric sensors, piezoresistive sensors, electromechanical transduction, industrial applications, pressure, strain.

1. Introducción

La vida moderna demanda información de manera constante, tanto en el ámbito industrial como en la vida cotidiana. Vivimos en la era de la información, de ahí la relevancia de la mensuración como un factor que provea datos confiables, transformables en información útil para la toma de decisiones. Los sensores cumplen este propósito: relacionarse con la realidad física y extraer de ella una cuantificación del fenómeno, proporcionando datos precisos y fiables.

Numerosos manuales, estudios e investigaciones se han centrado en los sensores, dada su utilidad en campos tan diversos como la academia, la medicina, las ciencias y la tecnología, lo que los convierte en un tema de gran interés para la comunidad científica. Escribir sobre sensores implica adentrarse en un ámbito muy amplio, donde cada categoría genera un universo propio en cuanto a formas de construcción, principios fundamentales de funcionamiento y posibles aplicaciones.

Considerados dispositivos ideales para mensurar y cuantificar, los sensores han sido previamente investigados y categorizados según el medio de transducción y la realidad captada. En esta oportunidad, se propone una aproximación detallada y específica a dos tipos de sensores que comparten un mismo principio fundamental: el efecto piezo.

Conocer la especificidad técnica de los sensores resulta crucial para garantizar una reproducibilidad académica que potencie nuevos conocimientos, permitiendo además comprender en detalle su construcción y funcionamiento. Esta revisión se centra en los sensores piezoeléctricos y piezorresistivos, motivada por la curiosidad de examinar su construcción, sus componentes internos y, más allá del conocimiento básico, explorar capacidades que puedan ser aprovechadas en el desarrollo científico, en beneficio de la academia y en nuevas aplicaciones prácticas.

2. Desarrollo

La investigación se sustenta en una metodología bibliográfico-documental, basada en la revisión sistemática de fuentes académicas especializadas. Para ello, se incluyeron artículos científicos, libros especializados, informes técnicos y recursos digitales indexados en bases de datos de reconocido prestigio. Muchas de las fuentes consultadas están en inglés, idioma predominante en las publicaciones científicas.

El proceso de selección y análisis se rigió por criterios de pertinencia, actualidad y validez epistemológica, garantizando el uso de estudios relevantes y de autores reconocidos en el campo. La validez de las fuentes y la sistematización de los hallazgos aseguran la confiabilidad de los resultados, los cuales se presentan con el rigor propio de la investigación científica, respaldado por protocolos establecidos en la literatura metodológica especializada.

Sensores Piezorresistivos

Etimológicamente, el término *piezorresistencia* se compone de “piezo”, del griego *piezein*, que denota presión o compresión (Harper, 2023), y del latín resisto-ere, que significa parar, detener u oponer resistencia (Segura Munguía, 2013). Así, puede comprenderse como aquellos dispositivos que, ante un cambio de forma (deformativo) o de torsión, generan variaciones en las propiedades resistivas del componente.

Dios Peón (2021) indica:

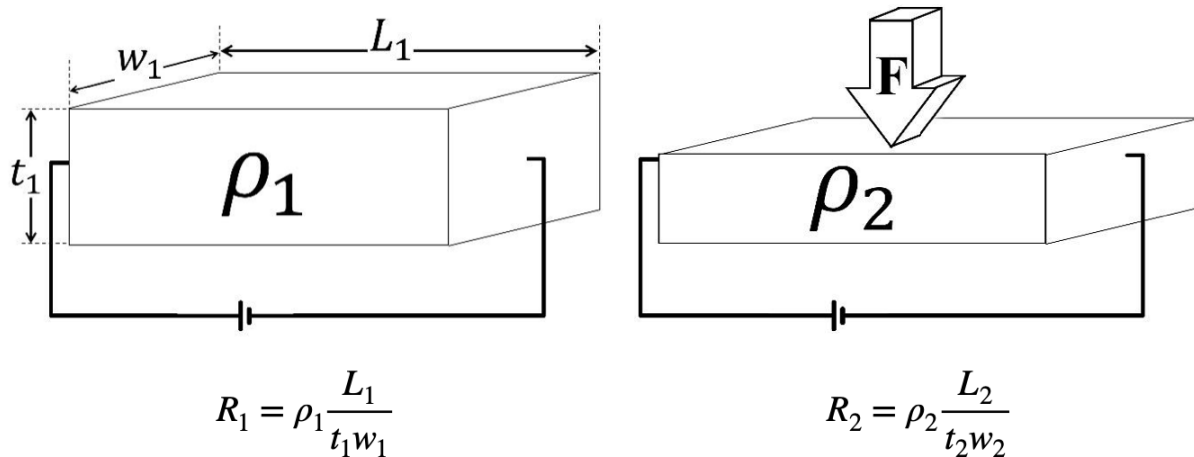
El descubrimiento de la piezorresistividad se remonta a 1856 y se atribuye a Sir William Thomson. En 1954, se dio un paso adelante en el desarrollo de dispositivos piezorresistivos con el descubrimiento del efecto piezorresistivo en el silicio (Si) y el germanio (Ge). La contribución de la tecnología de circuitos integrados llevó al desarrollo de la primera generación de sensores de deformación comerciales, en forma de galgas extensiométricas, a fines de la década de 1950.

El efecto piezorresistivo consiste en el cambio de la resistencia eléctrica de un material –por ejemplo, semiconductores– cuando recibe una tensión mecánica. Este cambio puede deberse a dos escenarios: una modificación en la geometría o una alteración en la conductividad del material (Kristler, 2023).

Se considera que un material es piezorresistivo cuando, sometido a un esfuerzo mecánico, no solo varía su resistencia eléctrica por cambios geométricos, sino que también altera su resistividad específica.

Figura 1

Representación de la variación de la resistencia eléctrica en un material piezorresistivo



Nota: Adaptado de Figura 1.4 (p. 9) Dios Peón, José Ramón, 2021, Composites poliméricos conductores y piezorresistivos integrados mediante proceso de fabricación avanzada. Universidad País Vasco.

Normalmente, los sensores piezorresistivos están contruidos con una matriz de electrodos y una placa impresa a la que se añade un elastómero conductor; en este tipo de construcción, la conductividad es el resultado de la presión ejercida sobre el material (Castellanos Ramos, 2015).

Otros sensores piezorresistivos se elaboran con materiales semiconductores tipo “p”, que se difunden en una base de material semiconductor tipo “n”. Esto genera una resistencia que varía según la compresión o estiramiento del material (Morris & Langari, 2012).

Algunos se fabrican con una membrana resistiva de silicio monocristalino, fijada en la carcasa y conectada al exterior mediante un electrodo. Cuando el sustrato se deforma por una fuerza externa, la resistencia varía, produciendo una salida en desequilibrio. Este tipo de sensor es especialmente popular para la medición de presión (Ericco Intertial System, 2023).

Sensores Táctiles piezorresistivos

Nguyen y Seop Lee (2021) definen que los transductores basados en el efecto piezorresistivo presentan baja impedancia, alta sensibilidad

y un amplio rango dinámico. El cambio en la resistencia se expresa mediante la ecuación:

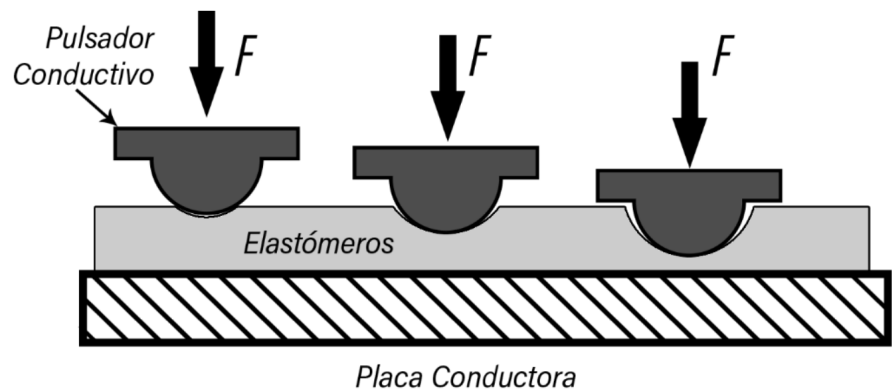
$$\Delta R = (1 + 2\sigma + M_i) \times R_x \Delta R = (1 + 2\sigma + M_i) \times R_x$$

donde σ es el índice de Poisson, χ la deformación longitudinal y M_i el coeficiente de elastoresistencia longitudinal adimensional (Nguyen & Lee, 2021).

Estos sensores se fabrican con materiales cuya resistencia eléctrica depende de la tensión aplicada. Se les incorpora una resistencia sensible a la fuerza (FSR, por sus siglas en inglés). Algunos son elastómeros conductores sensibles a la presión; otros se elaboran con caucho, silicona, poliuretano u otros compuestos con fibras conductoras. También se pueden fabricar de caucho conductor impregnado con polvo de carbón.

Los principios operativos de los sensores táctiles elastoméricos se basan en variar el área de contacto cuando el elastómero se comprime entre dos partes conductoras, o en modificar el espesor del elastómero (Fraden, 2016, p. 323).

Figura 2
Sensor táctil FSR. Aplicación en espesor con elastómero



Nota: Adaptado de Figura 7.50 (p. 324) Fraden, Jacob; 2016, Handbook of Modern Sensors. Springer.

En cuanto a otros materiales utilizados para la construcción de sensores piezorresistivos, Nguyen y Lee (2021), establecen algunos con los cuáles se han realizado pruebas obteniendo buenos resultados, éstos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1
Cuadro resumen del rendimiento de algunos materiales piezorresistivos utilizados para sensores táctiles

Material	Estructura	Ventajas
Aleaciones de Metales	Película circular ultrafina	Alta Sensibilidad
NiCr	Plano delgado	Deformable
Zr55Cu30Ni5Al10 Vidrio Metálico	Capa de película delgada flexible	Flexible, alta sensibilidad
Carbón	Pirámide de electrodos planos	Flexibilidad, mapeo de posición, buena precisión

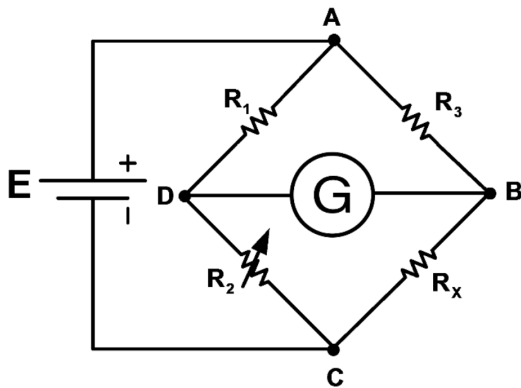
Nota. Adaptado de Recent development of flexible tactile sensors and their applications, por T. D. Nguyen y J. S. Lee, p. 5, 2022, Sensors.

Acelerómetros piezorresistivos

Los acelerómetros piezorresistivos constituyen una categoría de sensores piezorresistivos empleados para medir aceleración y vibración a bajas o medias frecuencias, aprovechando la tecnología extensiométrica. Entre sus características destacan la salida amplificada, la compensación de temperatura y su alta precisión (Sensing, Sensores de Medida, 2019).

Eren (2014) explica que estos acelerómetros están conformados por galgas extensiométricas semiconductoras, cuya respuesta depende de la tensión aplicada y de sus dimensiones. El principio de transducción que utilizan se basa en el puente de Wheatstone.

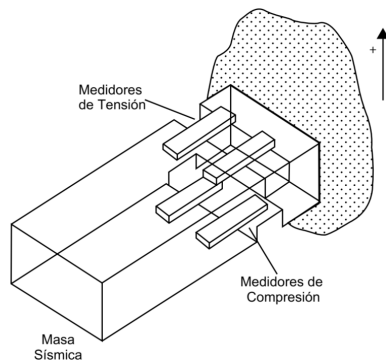
Figura 3
Construcción del puente de Wheatstone



Nota: Adaptado de Puente de Wheatstone, por Instrumentos de Medición, 2023, Instrumentos de Medición. (<https://instrumentosdemedicion.org>)

Los sensores piezorresistivos son dispositivos de medición de aceleración estática inherente a su naturaleza, entre las características típicas de los acelerómetros piezorresistivos son 100 mV g-1 de sensibilidad, 0-750 Hz de frecuencia, 2500 Hz en frecuencia de resonancia, 25 g de amplitud, 2000 g en clasificación de choque y entre 0 °C – 95 °C en cuanto a temperatura, a esto se le suma la masa total que es de aproximadamente 25 gr (Eren, 2014).

Figura 4
Construcción mecánica de un acelerómetro piezorresistivo



Nota. Adaptado de Figura 5.2.9 (p. 145), Wilson, Jon; 2005, Sensor Technology Handbook. Newnes

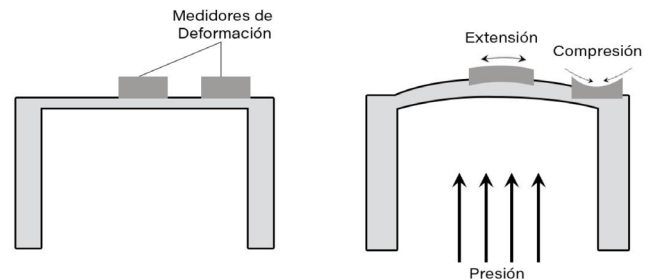
Sensores de presión piezorresistivos

Harman (2005) explica como los sensores de presión transforman las presiones de entrada en salidas eléctricas, esto para medir la presión, la fuerza y el flujo de aire (fluidos), también se utilizan para medir la altitud, la turbidez en los aviones y son necesarios para registrar los datos de vuelo.

Los sensores de presión modernos, ofrecen un alto grado de repetitividad, baja histéresis y una gran estabilidad con entradas de presión relativamente bajas. (Harman, 2005)

Los sensores de presión piezorresistivos actuales se construyen a base de silicio cristalino extremadamente delgados, menos de un milímetro de espesor. Al ser un componente versátil, el silicio aporta la capacidad de ser más sensible. Esto se comprende mejor con la siguiente ilustración:

Figura 5
Galgas extensiométricas en un sensor de presión



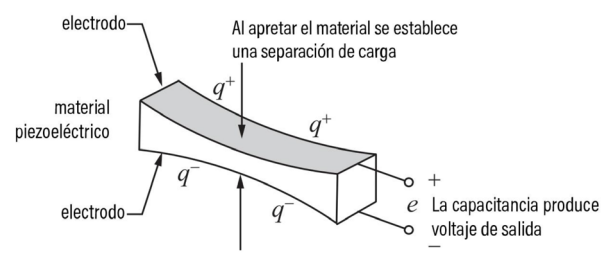
Nota: Adaptado de Figura 1 (p. 2) Boyn, Sören (2019), Piezoresistive Pressure Measurement Technology, Keller. (<https://keller-druck.com>)

Cuando la presión actúa en un lado de membrana de silicio, se deforma y provoca una tensión mecánica en las resistencias piezorresistivas. Dependiendo de la posición, el valor de la resistencia aumenta o disminuye. La sensibilidad a la presión del chip se puede ajustar mediante el espesor de la membrana restante (Boyn, 2019).

Sensores Piezoeléctricos

El principio de funcionamiento de los sensores piezoeléctricos se puede describir a partir de la siguiente imagen:

Figura 6
Ilustración del funcionamiento de un sensor piezoeléctrico



Nota. Adaptado de Fig. 7.18 (p. 183) Adams, Thomas; Layton, Richard (2010), *Introductory MEMS Fabrications and Applications*, Springer.

Se reitera que el prefijo “piezo” significa apretar o presionar. Moris y Langari (2012) explican que los sensores piezoeléctricos generan un voltaje de salida cuando se someten a una fuerza constrictora y, además, pueden producir una fuerza de salida al aplicar un voltaje de entrada (modo inverso). Señalan que sus principales usos incluyen la medición de desplazamiento, aceleración, fuerza y presión.

Para un bloque rectangular de material, el voltaje inducido se determina mediante:

$$V = \frac{k F d}{A} \quad V = k F d$$

donde F es la fuerza aplicada, A el área del material, d el espesor y k la constante piezoeléctrica. La polaridad del voltaje inducido depende de si el material está comprimido o elongado (Morris & Langari, 2012, p. 322).

Los sensores piezoeléctricos operan gracias a un fenómeno caracterizado por la acumulación de cargas bajo tensión mecánica (efecto directo) y la deformación ante una señal eléctrica (efecto inverso) (Monllor Martínez, 2021, p. 13). Las propiedades piezoeléctricas se clasifican en directas e inversas

y se emplean ampliamente en transductores electromecánicos, que convierten energía eléctrica en mecánica y viceversa. En modo pasivo, los materiales piezoeléctricos directos generan voltaje ante un estrés externo; sus aplicaciones incluyen hidrófonos, micrófonos, pastillas de fonógrafo, encendedores de gas, medidores de tensión dinámica y sensores de vibración (Safari, Janas, Bandyopadhyay, & Kholkin, 2014).

Malmcrona (2018) describe la piezoelectricidad como un fenómeno bidireccional y reversible, de modo que al cesar la diferencia de potencial aplicada, el material retorna a su estado de reposo.

Para que se genere una carga eléctrica mediante efecto piezoeléctrico, se requiere un material cristalino, que puede ser un cristal natural como el cuarzo (SiO_2), o materiales artificiales como cerámicas polarizadas y ciertos polímeros, por ejemplo el fluoruro de polivinilideno (PVDF) (Jiménez Álvarez, 2024, p. 147).

Se presentan a continuación algunos de los materiales piezoeléctricos más comunes:

Tabla 2
Materiales piezoeléctricos más comunes

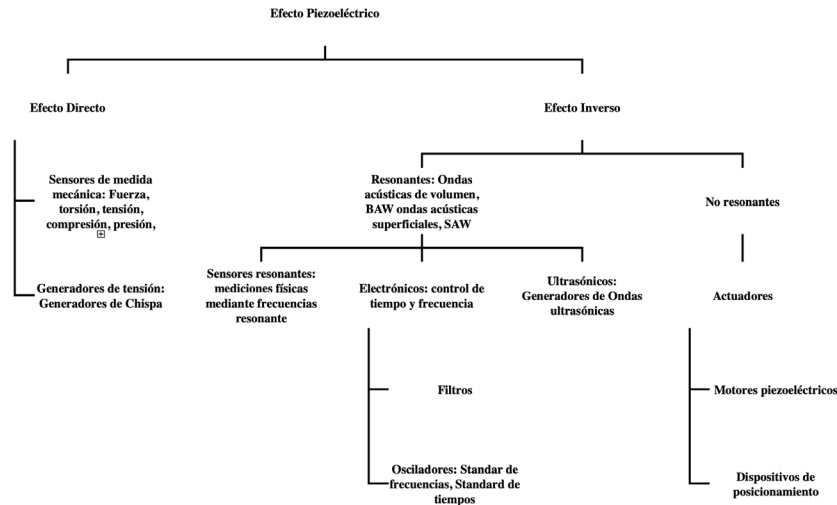
Naturales	Sintéticos
-Cuarzo	-PZT (titaniato de plomo con zinconato)
-Sal de Rochelle	-PVDF (Polímero de fluoruro de polivinilideno)
-Turmalina	-Titanato de bario
-Topacio	-Óxido de Zinc
-Sacarosa	

Nota. Adaptado de Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía, por Malmcrona, Arturo Martín, p. 9, 2018, Universidad Carlos III.

Se muestra en el siguiente esquema las diferentes aplicaciones del efecto piezoeléctrico:

Figura 7

Diferentes aplicaciones del efecto piezoeléctrico



Nota: Adaptado de Fig. 1.5 (p. 6) Fernández Galeano, Axcel Enrique; 2018, Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza. Universidad Politécnica de Valencia.

A continuación, se describen algunas de las mediciones físicas más significativas realizadas con sensores piezoeléctricos:

a. Sensor piezoeléctrico de Fuerza

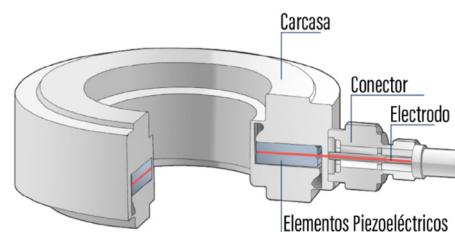
Los materiales piezoeléctricos son aquellos que generan una carga eléctrica al ser sometidos a tensión mecánica. El principio de funcionamiento de un sensor de fuerza piezoeléctrico es relativamente sencillo: la carga eléctrica producida es directamente proporcional a la tensión mecánica aplicada, la cual, a su vez, está relacionada con la fuerza ejercida. Un amplificador de carga puede convertir esta carga en una señal eléctrica de 0...10 V, fácil de medir, de manera que el voltaje de salida es proporcional a la fuerza aplicada (Kleckers, 2023).

Según Kleckers (2023), cuanto mayor es la fuerza aplicada, mayor es la tensión y, en consecuencia, mayor la carga generada, principio que se aprovecha para la medición de fuerza con sensores piezoeléctricos. Además, estos sensores contienen dos elementos cristalininos entre los cuales se ubica un electrodo que recoge la carga en los lados

internos de los cristales. Un cable conecta este electrodo a un amplificador de carga. Los cristales están alojados dentro de una carcasa metálica, cuya función es protegerlos y proporcionar un segundo punto de contacto entre ellos.

Figura 8

Esquema de un sensor de fuerza piezoeléctrico



Nota. Adaptado de esquema de sensor piezoeléctrico de fuerza, Kleckers, Thomas; 2023; So how does a piezoelectric force transducer work? Hottinger, Brüel & Kjaer.

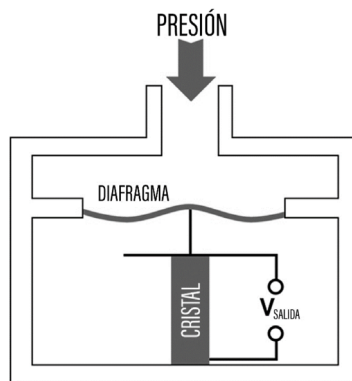
b. Sensor piezoeléctrico de Presión

Estos sensores aprovechan el efecto piezoeléctrico y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, sobre todo las de carácter industrial.

Cuando se aplica una fuerza, se genera una carga eléctrica en las caras del cristal, esta medida de carga es proporcional a la presión, no se recomiendan para medir presión estática, pero sí son altamente sensibles a cambios dinámicos de presión en una amplia gama de frecuencia y presión. (Avnet Inc., 2024)

Figura 9

Diagrama de un sensor de presión piezoeléctrico



Nota. Adaptado de Diagrama de sensor piezoeléctrico, Avnet Abacus; 2024; Pressure sensors: The design engineer's guide. Avnet Inc.

Además de ser altamente sensibles a los cambios dinámicos de presión, se reconoce en los sensores de presión piezoeléctricos las siguientes ventajas:

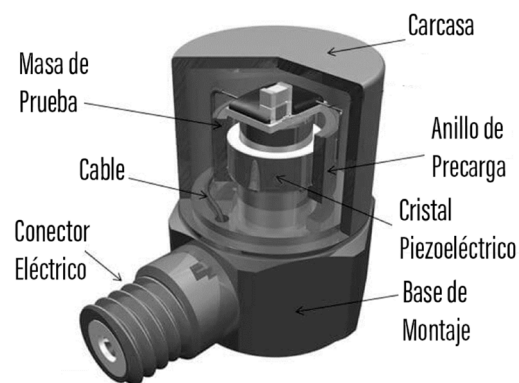
- Alta sensibilidad: lo que permite que sean utilizados para monitorear el rendimiento de motores y sistemas presurizados de frenos.
- Desempeñan un papel importante en la medición de la presión del aire, la presión de las cabinas de las aeronaves y la presión de combustible en los aviones.
- En las empresas industriales se utilizan para verificar la presión de los fluidos en tuberías, tanques y reactores, garantizando operaciones seguras y eficientes.

- Uso médico: se usan para medir la presión arterial, en dispositivos de terapia respiratoria y el control de la presión intracraneal.
- Monitoreo ambiental: se usan en la medición de la presión atmosférica, la profundidad del océano y presiones de aguas subterráneas. (Electricity - Magnetism, 2023).

c. Acelerómetros piezoeléctricos

Figura 10

Vista de un acelerómetro básico



Nota. Adaptado de Acelerómetro típico, PCB Piezoelectronics; 2024 Introductions to ICP Accelerometers.

Los acelerómetros piezoeléctricos se utilizan para medir vibraciones, entre las características que lo hacen ideal para este tipo de medidas se encuentran: una alta frecuencia y rangos dinámicos de alta linealidad, se consideran muy robustos y fiables porque las características se mantienen estables durante largos períodos de tiempo (Hottinger Brüel & Kjær, 2023).

En este tipo de acelerómetros, se utiliza el elemento piezoeléctrico para conectarlo a una cantidad conocida de masa, que se denomina masa de prueba. Cuando el marco del sensor se acelera debido a una fuerza externa, la masa de prueba tiende a experimentar inercia, por lo que deforma ligeramente el elemento piezoeléctrico, esta deformación es la que se utiliza para determinar la aceleración de entrada (EETech Media, 2024).

Para los acelerómetros existen tres métodos predominantes para inducir tensión en el cristal piezoeléctrico: compresión, corte y flexión. Dependiendo de la técnica se ofrecerá un atributo específico al acelerómetro, lo que afectará que sea más o menos apropiado para determinadas aplicaciones, estos métodos se ilustran y detallan a continuación:

- **Diseño de compresión:** su gran ventaja radica en la poca cantidad de componentes y su alta rigidez, esto sirve para generar un rango de frecuencia alto. Lamentablemente por estar el cristal demasiado cerca del contacto con la carcasa puede ocasionar medidas que no necesariamente pertenezcan a la aceleración y que llegan a ocasionar errores de medición. Ante esto no se recomienda este diseño para estructuras metálicas que puedan doblarse o para ambientes térmicamente inestables.
- **El diseño de corte:** es el que mejor rendimiento ofrece. Estos pueden ser de dos tipos:
 - Corte plano, que utilizan placas de cristal
 - Corte anular, que usan un cristal en forma de anillo.

Sin importar cuál sea el tipo de corte, la estructura del acelerómetro es rígida, proporcionando un rango de frecuencia alto, y como el cristal no está en contacto con la carcasa – se sujeta en un poste central se minimizan los efectos de tensión y efectos térmicos.

- **El diseño de flexión:** este diseño en particular, utiliza placas de cristal rectangulares o en forma de disco, esto es para mejorar la flexión, tienen como particularidad que son menos rígidos, en comparativa a los diseños anteriores, esto los dota de un rango de frecuencia limitado. El problema de este diseño radica en las altas tensiones a las que somete el cristal, lo que los hace susceptibles a daños por golpes o vibraciones excesivas. (PCB Piezoelectronic Inc., 2024)

Materiales alternativos para la construcción de sensores Piezorresistivos y Piezoeléctricos (Ver tabla 3)

De los dos tipos de sensores descritos, resulta especialmente llamativa la aplicación adicional que presentan los sensores piezoeléctricos en comparación con los piezorresistivos.

Los sensores piezorresistivos están destinados principalmente a medir magnitudes físicas; su objetivo es obtener una cuantificación numérica precisa de un fenómeno físico: una medición confiable.

En contraste, los materiales piezoeléctricos atraen gran interés en la comunidad científica porque, además de permitir la cuantificación y mensuración de magnitudes físicas, su estudio abre oportunidades para aplicaciones prometedoras, como la recolección de energía (energy harvesting). La generación de energía a partir de dispositivos piezoeléctricos ha llamado la atención de los investigadores debido a ventajas como su densidad de potencia, simplicidad de manufactura y escalabilidad. Por ello, numerosos estudios se enfocan en explorar este fenómeno con aplicaciones prácticas en el mundo moderno (Toprak & Tigli, 2014).

Toprak y Tigli (2014) mencionan que la recolección de energía piezoeléctrica puede dividirse en tres grandes escalas: macroescala, MEMS y nanoescala, cada una dependiendo del tipo de dispositivo recolector, del método de fabricación, del nivel de potencia alcanzado y de sus áreas de aplicación. La transducción piezoeléctrica destaca por su alto factor de acoplamiento electromecánico, lo que explica el interés creciente en la especialidad. Sumado a esto, los avances en materiales, procesos de fabricación especializados y la miniaturización han permitido integrar esta tecnología en diversas aplicaciones para convertir energía mecánica en fuentes alternativas de energía limpia y renovable (Sezer & Muammer, 2021).

Tabla 3
Nuevos materiales para Sensores Piezoeléctricos y Piezorresistivos

Tipo de Sensor	Material	Características Principales
Piezoeléctrico	Nanotubos de carbono (CNT) (Alamusi, y otros, 2011)	Mejores propiedades eléctricas
		Altamente sensibles
		Excelente respuesta estática y dinámica
	GO/PU (Piel artificial a base de Óxido de grafeno y poliuretano) (Mastropasqua, Veca, Damin, Brunella, & Cesano, 2023)	Aptos para señales de baja corriente
		Libres de metales
		Útiles para sensores de deformación
	Microfibras electrohiladas a base de policaprolactona (PCL) con nanoplaquetas de grafenio (GNP) (Francavilla, Ferreira, Araújo, & Fangueiro, 2021).	Alta sensibilidad a las presiones externas
		Durabilidad al prensado repetitivo
		Alta conductividad eléctrica.
	Polianilina (PANI) (Cruz-Pacheco, y otros, 2020)	Excelentes propiedades eléctricas
Facilidad de procesamiento		
Error se reduce ante presencia de voltajes altos		
	Se recomiendan para detección de tensión y deformación	
Pezorresistivo	Nanocables ferroeléctricos de sulfiyoduro de antimonio (SbSI) (Toroń, Szperlich, & Kozioł, 2020)	Altos valores en el coeficiente piezoeléctrico y electromecánico.
	Películas de CeO2−x dopadas con Gadolinio (Gd) (Park, 2022)	Tienen una estructura centrosimétrica de fluorita cúbica, se logran valores muy altos de tensión piezoeléctrica inducida por el campo eléctrico y coeficientes piezoeléctricos longitudinales aparentes
	Titanato de circonato de plomo (PZT) (Aabid, y otros, 2021)	Material ferroeléctrico
		Amplia gama de aplicaciones como material piroeléctrico
		Usado en reparación de griegas, control de formas, vibraciones y monitoreo estructural
Óxido de Zinc (ZnO) (Mahapatra, y otros, 2021)	Contiene diversas nanoestructuras y exhibe propiedades semiconductoras y piezoeléctricas, esto se debe a su estructura cristalina no centrosimétrica.	

3. Conclusión

El estudio y la caracterización de los sensores piezoeléctricos y piezorresistivos evidencian que, aunque comparten un principio de funcionamiento común —la respuesta ante estímulos mecánicos como presión, deformación o tensión—, difieren notablemente en mecanismos de transducción, arquitectura interna, materiales constitutivos y potencialidades de aplicación.

En el caso de los sensores piezorresistivos, se destacan su precisión en la cuantificación de esfuerzos mecánicos mediante variaciones en la resistencia eléctrica, así como la versatilidad de los materiales empleados en su construcción. Su aplicación abarca sensores táctiles, de presión y acelerómetros, consolidándose como soluciones confiables en entornos industriales, estructurales y biomédicos. Además, son robustos y estables frente a condiciones ambientales variables, fáciles de integrar en sistemas electrónicos y altamente compatibles con tecnologías microelectromecánicas, lo que los convierte en herramientas clave para mediciones precisas en tiempo real.

Por su parte, los sensores piezoeléctricos añaden la capacidad de convertir energía mecánica en señales eléctricas, característica que los hace especialmente atractivos en la búsqueda de energías renovables y limpias. La deformación de materiales piezoeléctricos —naturales o sintéticos— permite generar cargas eléctricas

útiles, abriendo oportunidades en el desarrollo de energías autosustentables. Esta capacidad les confiere escalabilidad, posibilitando la integración de sensores en superficies sometidas a vibraciones o fuerzas mecánicas para funcionar como fuentes de energía.

Otra aplicación relevante de los sensores piezoeléctricos es el monitoreo de la salud, siendo empleados en mediciones de presión arterial, respiración o tensión muscular, lo que refuerza su importancia en la medicina moderna.

Esta aproximación documental permite conocer la base técnica y estructural de los sensores piezorresistivos y piezoeléctricos, ofreciendo un panorama actualizado de su amplia gama de aplicaciones y relevancia creciente en un mundo que demanda fiabilidad, exactitud y precisión, traducidas en aplicaciones ambientalmente sostenibles e inteligentes.

Finalmente, se observa que apenas se ha comenzado a explorar su potencial. Se sugieren futuras líneas de investigación centradas en la optimización de materiales piezoeléctricos, particularmente en el desarrollo de circuitos de almacenamiento y gestión de energía que faciliten su experimentación e implementación. Los sensores ya no son únicamente dispositivos pasivos dedicados a medir, sino elementos activos que, al interactuar con el entorno físico, generan nuevas oportunidades de expansión del conocimiento y de innovación científica.

4. Referencias

- Aabid, A., Raheman, M., Ibrahim, Y., Anjum, A., Hrairi, M., Parveez, B., . . . Mohammed. (2021). A Systematic Review of Piezoelectric Materials and Energy Harvester for industrial Applications. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s21124145>
- Adams, T. M., & Layton, R. A. (2010). *Introductory MEMS. Fabrications and Applications*. Springer.
- Alamusi, Hu, N., Fukunaga, H., Atobe, S., Liu, Y., & Li, J. (2011). Piezoresistive Strain Sensors Made from Carbon Nanotubes Based Polymer Nanocomposites. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s111110691>
- Avnet Inc. (2024). *Avnet Abacus*. Recuperado el 15 de 01 de 2024, de <https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric>
- Boyn, S. (2019). *Keller Pressure*. Obtenido de keller-druck.com

- Castellanos Ramos, J. (2015). *Caracterización, modelado y diseño de sensores táctiles piezorresistivos*. Universidad de Málaga, Málaga. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/11333>
- Cruz-Pacheco, A., Paredes-Madrid, L., Orozco, J., Gómez-Cuaspad, J., Batista-Rodríguez, C., & Palacio Gómez, C. (2020). Assessing the Influence of the Sourcing Voltage on Polyaniline Composites for Stress Sensing Applications. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym12051164>
- Dios Peón, J. R. (2021). *Composites Poliméricos Conductores y Piezorresistivos integrados mediante Procesos de Fabricación Avanzada*. Universidad del País Vasco. <http://hdl.handle.net/10810/52926>
- EETech Media. (2024). *All about circuits*. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-piezoelectric-accelerometers-piezoelectric-sensor-basics/>
- Electricity - Magnetism. (2023). *electricity-magnetism.org*. <https://www.electricity-magnetism.org/piezoelectric-pressure-sensor/>
- Eren, H. (2014). Acceleration, vibration and shock measurement. En J. G. Webster, & H. Eren, *Measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC Press.
- Ericco Intertial System. (2023). *Ericco Inertial System*. www.ericcointernational.com
- Fernández Galeano, A. E. (2018). *Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors*. Springer.
- Francavilla, P., Ferreira, D., Araújo, J., & Fanguero, R. (2021). Smart Fibrous Structures Produced by Electrospinning Using the Combined Effect of PCL/Graphene Nanoplatelets. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app11031124>
- Harman, G. (2005). Piezoresistive Pressure Sensing. En J. Wilson, *Sensor Technology Handbook* (págs. 411-430). Newnes.
- Harper, D. (2023). *Etymonline* - Diccionario etimológico en línea. <https://www.etymonline.com/es/word/piezo->
- Hottinger Brüel & Kjær. (2023). *HBK World*. <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/vibration/piezoelectric-accelerometers>
- Jiménez-Álvarez, R. L. (2024). Caracterización de los tipos de sensores y su interacción con la realidad física. (UNICAES, Ed.) *Producción Agropecuaria Y Desarrollo Sostenible*, 12(1), 131–156. <https://doi.org/10.5377/payds.v12i1.17421>
- Kleckers, T. (2023). *HBK, Hottinger, Brüel & Kjaer*. <https://www.hbkworld.com/en/knowledge/resource-center/articles/how-does-a-piezoelectric-force-transducer-work>
- Kristler, G. (2023). *kristler.com*. <https://www.kistler.com/ES/es/efecto-piezorresistivo/C00000142>
- Mahapatra, S. D., Mohapatra, P. C., Aria, A. I., Christie, G., Mishra, Y. K., Hofmann, S., & Thakur, V. K. (2021). Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials. *Advance Science*. <https://doi.org/10.1002/advs.202100864>
- Malmcrona, A. M. (2018). *Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía*. Universidad Carlos III, Madrid.

- Mastropasqua, C., Veca, A., Damin, A., Brunella, V., & Cesano, F. (2023). Functional Piezoresistive Polymer Composites Based on CO₂ Laser-Irradiated Graphene Oxide-Loaded Polyurethane: Morphology, Structure, Electrical and Piezoresistive Properties. *Nanomaterials*. <https://doi.org/10.3390/nano13010168>
- Monllor Martínez, P. (2021). *Transductores piezoeléctricos aplicados a la generación de energía. Estudio experimental*. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Morris, A. S., & Langari, R. (2012). *Measurement and Instrumentation. Theory and Application*. Elsevier.
- Nguyen, T.-D., & Lee, J. S. (2021). Recent Development of flexible tactile Sensors and their applications. *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s22010050>
- Park, D.-S. H. (2022). Induced giant piezoelectricity in centrosymmetric oxides. *Science*. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abm7497>
- PCB Piezoelectronic Inc. (2024). *PCB Piezoelectronics an Amphenol Company*. <https://www.pcb.com/sensors-for-test-measurement/accelerometers/sensing-geometries>
- Safari, A., Janas, V. F., Bandyopadhyay, A., & Kholkin, A. (2014). Piezoelectric sensors and transducers. En J. Webster, & H. Eren, *Measurement, instrumentation and sensors handbook*. CRC Press.
- Segura Munguía, S. (2013). *Nuevo Diccionario etimológico latín-español*. Deusto.
- Sensing, sensores de medida. (2019). *Sensing, Sensores de Medida*. <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/accelerometers-sensores-de-aceleracion/accelerometers-piezoresistivos/>
- Sezer, N., & Muammer, K. (2021). A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>
- Toprak, A., & Tigli, O. (2014). Piezoelectric energy harvesting: State of the art and challenges. *Applied Physics Review*. <https://doi.org/10.1063/1.4896166>
- Toroń, B., Szperlich, P., & Kozioł, M. (2020). SbSI Composites Based on Epoxy Resin and Cellulose for Energy Harvesting and Sensors—The Influence of SBSI Nanowires Conglomeration on Piezoelectric Properties. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma13040902>