

Sensors of Force, Displacement and Acceleration for Biomedical Use: Physical Principles, Features and Costs

Agustín Fernández Graña

Docentes: Marta Rosecler Bez, María José González, Franco Simini

□

Abstract— In any modern electronic device it is practically unthinkable not to find one or several sensors, both analog and digital. The variety of magnitudes sensed, the price getting lower and their availability in the market increasing, has as a consequence that decision making on any natural phenomenon is greatly simplified by using a sensor. Therefore, this work intends to give an overview about the sensors of force, distance and acceleration that exist in the market, their principle of operation, characteristics that make them appropriate for certain applications and their price in the market. As a general result, the most accurate force sensors are those calibrated and backed by a company that certifies them, as expected, but their price almost insurance exceeds USD 300 and the most common applications that use them have an industrial purpose. The most accurate distance sensors are those using laser or ultrasonic technology, most of them using the technique of measuring flight time to calculate the distance. Those using ultrasound allow good measurements on a wider variety of media, such as water and transparent surfaces where optical methods are deficient. The average price of small-range sensors is in tens of dollars, while those of large-range cost a few hundred dollars. There are mainly three types of acceleration sensors, better known as accelerometers: piezoelectric, piezoresistive and capacitive. Piezoresistive and capacitive accelerometers can provide dual acceleration components and have higher stability.

Palabras clave—acelerómetro, galgas extensométricas, infrarrojo, láser, sensor capacitivo, sensor de aceleración, sensor diferencial capacitivo, sensor de fuerza, sensor de distancia, piezoeléctrico, ultrasonido.

I. INTRODUCCION

EL presente trabajo está enmarcado en el Seminario de Ingeniería Biomédica, curso que se dicta en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. El objetivo de este trabajo es dar una idea general de los sensores existentes en el mercado para medir fuerza, desplazamiento y aceleración. Para cada uno de ellos se menciona el principio físico y algunas características importantes a considerar al seleccionarlos.

El tema desarrollado aquí está inspirado en lo expuesto por la Dra. Marta Rosecler Bez en el Seminario titulado “Monitoreo de pacientes con dispositivos vestibles

(wearable devices)”.

II. SENSOR

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, y transformarlas en variables eléctricas. Por lo tanto un sensor debe tener algún elemento sensible a la magnitud que se quiere detectar y debe ser capaz, por sus propias características o por medio de dispositivos intermedios, de transformar esa magnitud en un cambio eléctrico que se pueda introducir en un circuito que la utilice directamente o en una etapa previa que la condicione (amplificando, filtrando, etc.) para que finalmente se la pueda utilizar para tomar alguna decisión [1]. Las magnitudes que se quieren captar pueden ser por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, presión, desplazamiento, fuerza, humedad, movimiento, pH, entre otras. Las variables eléctricas que se pueden incluir en un circuito son por ejemplo: una resistencia eléctrica, una capacidad, una tensión eléctrica, una corriente eléctrica, etc.

III. SENSORES DE FUERZA

La fuerza se puede medir de muchas maneras:

- por medición directa en el flujo de la fuerza o por derivación de fuerzas (o sea, sin intervención de un transductor de fuerza)
- con diferentes tecnologías de sensores; por ejemplo, de galgas extensiométrica o piezoeléctricos.

A. Sensores de fuerza basados en galgas extensiométrica

Los sensores o transductores de fuerza basados en galgas extensiométrica utilizan lo que se denomina un “cuerpo elástico” o “cuerpo de deformación”, sobre el que se aplican las fuerzas que se desea medir. Cuando se aplica una fuerza, el elemento de muelle se deforma y experimenta una elongación en su superficie. Por lo tanto, la función del elemento de muelle consiste en convertir las fuerzas que queremos medir en deformaciones, de la forma más lineal y reproducible que se pueda. Muchas de las propiedades de los transductores de fuerza vienen dadas por el diseño y la selección de materiales del elemento de muelle.

El elemento sensor en sí es la galga extensiométrica, que consiste en una capa de aislamiento, denominada soporte, a la que se une una rejilla de medida. Estas

Este documento fue escrito el 02 de julio de 2017 para el curso “Seminario de Ingeniería Biomédica” dictado en la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

galgas extensiométrica se unen al elemento de muelle en puntos adecuados. En general se utilizan cuatro galgas, y se instalan de modo que, al aplicar una fuerza, dos se estiren y las otras dos se compriman [2].

Estas cuatro galgas extensiométricas se conectan entre sí formando un puente de Wheatstone. El puente de Wheatstone se alimenta con una tensión de excitación. Cuando las cuatro resistencias son diferentes, se produce una tensión de salida; por ejemplo, cuando la resistencia de las galgas cambia debido a una deformación.

La señal de salida depende de los cambios en la resistencia de las galgas extensiométricas y, por lo tanto, tiene una dependencia directa con la fuerza aplicada. En la Fig. 1 se pueden ver los elementos mencionados que forman parte de un sensor de fuerza que usa galgas extensiométricas.

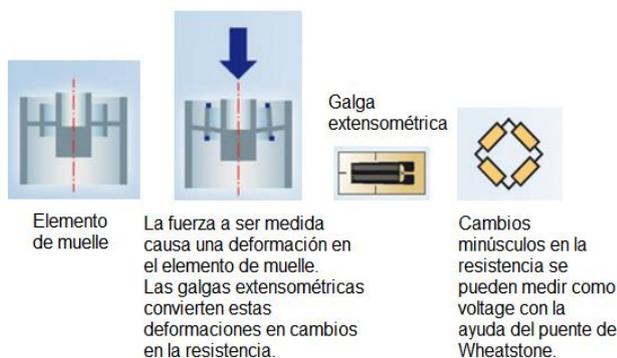


Fig. 1. Funcionamiento de un transductor de fuerza a base de galgas extensiométricas, utilizando el ejemplo de un transductor de torsión anular (tipo C18). (Fuente: HBM Test and Measurement [2])

Las ventajas de este principio de medida basado en galgas extensiométricas son varias. Las principales son:

- Si la resistencia eléctrica de las galgas extensiométrica cambia en la misma dirección (aumenta ó disminuye) y en la misma magnitud, no se genera ninguna señal de salida. Eso significa que es posible compensar numerosas influencias parásitas. Por ejemplo, la dependencia del punto cero con la temperatura, la influencia del momento de flexión, efectos de fuerzas laterales, etc.
- Este principio de medida permite fabricar transductores de muy alta precisión con costos relativamente bajos.
- La fuerza nominal del transductor está determinada exclusivamente por la rigidez del elemento muelle.

En el ambiente fisiológico la galga es un dispositivo que permite medir pequeños desplazamientos. Son pequeñas y duras, características que le hacen presentar una rápida respuesta en el tiempo. En la práctica, la velocidad de respuesta es frecuentemente limitada por el dispositivo en el cual se conecta la galga. La galga es usada frecuentemente en equipos biomédicos. Una de las primeras aplicaciones fue como transductor para detectar el movimiento de un diafragma expuesto a la presión sanguínea. Muchos de los transductores de presión sanguínea comerciales utilizan este principio.

B. Sensores Piezoeléctricos

Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas. El efecto piezoeléctrico es un fenómeno que ocurre en determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, en su masa adquieren una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

Este fenómeno también ocurre a la inversa: se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma.

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que carecen de centro de simetría. Según como se disponga y utilice el material piezoeléctrico, se pueden conseguir sensores de presión, fuerza o aceleración. En la Fig. 2. se puede ver una representación de la configuración empleada para obtener los diferentes sensores. En los acelerómetros se requiere adjuntar al material piezoeléctrico una masa sísmica conocida que permite, mediante la segunda ley de Newton, obtener la aceleración [3]. Los sensores de presión y fuerza son casi idénticos. La principal diferencia es que los sensores de presión utilizan un diafragma para recoger la presión, que es simplemente la fuerza aplicada sobre un área.

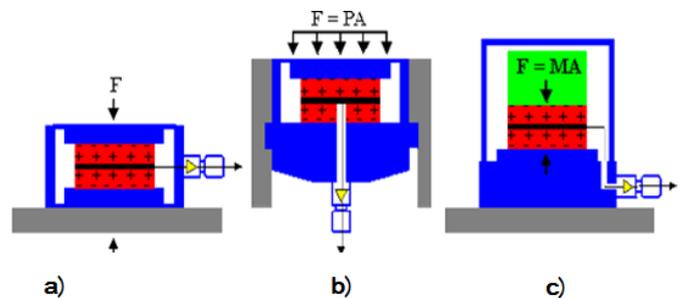


Fig. 2. Representación de la configuración utilizada para obtener diferentes sensores piezoeléctricos. a) Sensor de fuerza, b) Sensor de presión, c) acelerómetro. (Fuente: General Piezoelectric Theory, PCB Piezotronics [3])

Aunque los sensores piezoeléctricos sean sistemas electromecánicos, que reaccionan a una presión, los elementos de medición no muestran casi ninguna deformación (la deformación típica de los elementos de medición es de tan sólo unos pocos micrómetros). Esta es la razón de la robustez de los sensores piezoeléctricos, la alta frecuencia propia y la excelente linealidad en condiciones de uso extremas. Además, la tecnología piezoeléctrica no es sensible a campos electromagnéticos y a radiaciones.

Una desventaja de los sensores piezoeléctricos es que no son apropiados para mediciones estáticas. Una fuerza estática conlleva a una carga eléctrica definida en la superficie del material piezoeléctrico, que mediante el uso de electrónica convencional y materiales no aislantes se

va perdiendo. Esto tiene como consecuencia una pérdida de la señal. También las temperaturas elevadas provocan una reducción adicional de la resistencia interna, por lo tanto sólo deben ser utilizados materiales con una mayor resistencia interna.

En la Fig. 3 se puede ver la respuesta en frecuencia de un sensor piezoeléctrico con carga, donde se aprecia claramente la atenuación de las señales de baja frecuencia. La zona donde la respuesta es constante, indica que la tensión de salida es proporcional a la fuerza aplicada para un rango amplio de frecuencias donde se pueden hacer mediciones para el comportamiento lineal.

Muchos sensores del mercado agregan al transductor piezoeléctrico, un circuito acondicionador para modificar la respuesta en frecuencia y amplificar la señal de salida.

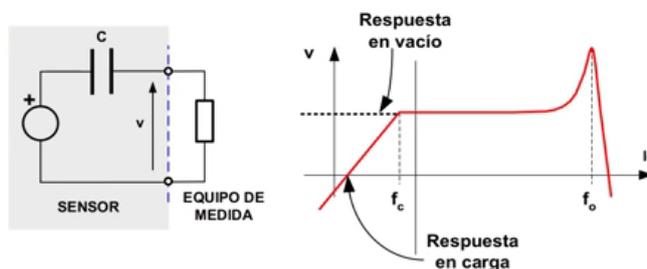


Fig. 3. Respuesta en frecuencia de un sensor piezoeléctrico al que se le conecta una carga. (Fuente: [4])

C. Costo de los sensores de fuerza

Para comprar un sensor de fuerza es muy importante tener definidos la dirección y sentido de las fuerzas a medir, el rango de medida, si incluye calibración, el diseño de la célula de carga y el principio físico que usa para medir. En la Tabla I se pueden ver algunos de los sensores de fuerza que se ofrecen en el mercado.

TABLA I
COSTOS Y CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS SENSORES DE FUERZA

Modelo	HBM-S9M/5k N	Forsente k-FCLB/5 kN	HBM-C2/10 kN	HBM-S2M/20 N	FX1901	PUSHT ON-S1
Diseño						
F. nom. (kN)	5,00	5,00	10,00	0,02	0,44	0,50
Sensib. (mV/V)	2	1	1	2	20	2
Tens. Compres.	Ambas	Comp.	Comp.	Ambas	Comp.	Ambas
Calibrado	Si	Si	Si	Si	No	No
Galgas/ Piezo	G	G	G	G	G	G
Precio (USD)	350	99	300	235	31	26
Ubicación del Art.	US	China	US	US	US	China

La mayoría de los sensores piezoeléctricos calibrados y de alta precisión del mercado se venden para aplicaciones industriales donde se requiere medir fuerzas del orden de kN. Su precio generalmente supera fácilmente los 300 dólares. Son altamente robustos y muy idóneos para

aplicaciones altamente dinámicas, como por ejemplo, procesos de prensado. Además gracias a su diseño compacto ahorran mucho espacio en comparación con otras tecnologías de sensores.

En la Fig. 4 se muestra un sensor piezoeléctrico flexible, que consiste en una lámina piezoeléctrica que al ser sometida a una fuerza externa en la dirección perpendicular a su plano, produce un voltaje alto de salida. La salida analógica de este sensor puede ser utilizada como disparador de un circuito MOSFET o CMOS. También su extremo flexible permite que se lo utilice para implementar acelerómetros o sensores de vibración. Comúnmente se lo usa en sensores de vibración para máquinas de lavar, switches de despertado de bajo consumo, sensores de vibración de bajo costo, alarmas de automóviles, aplicaciones médicas y sistemas de seguridad [5].



Fig. 4. Sensor de fuerza, membrana piezoeléctrica vibrante. USD 3,6/unidad. (Fuente: LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch [6])

IV. SENSORES DE DISTANCIA

Los sensores o transductores de distancia, están pensados para realizar la medida de distancia lineal ya que proporcionan una señal eléctrica según la distancia entre el sensor y el objeto de interés.

Los rangos de medida disponibles son muy diversos, según el tipo de sensor de distancia empleado. Hay modelos que tienen rangos de unas pocas micras y otros modelos que pueden llegar a medir cientos de metros. En función del rango requerido, el formato del sensor varía, siendo más o menos voluminoso, con mayor o menor protección IP (Ingress Protection), etc.

Los tipos de sensores de distancia que existen son muchos, por lo que clasificarlos en categorías resulta algo indispensable. Las categorías que involucran casi la totalidad de la tecnología disponible en el mercado son de acuerdo a lo publicado por [7]:

- Sensores de distancia por cable
- Sensores de distancia por cinta
- Encoder lineal magnético
- Sensores de distancia magnetostriictivos
- Potenciómetros lineales
- Reglas digitales
- Extensómetro lineal
- Palpadores inductivos
- Sensores de distancia LVDT
- Sensores de distancia láser
- Láser de perfil 2D
- Sensores de distancia inductivos
- Sensores de distancia por ultrasonido
- Sensores de distancia ATEX

En este documento sólo se describen los sensores más nuevos de uso en dispositivos electrónicos que puedan

servir en equipos de uso clínico. Por lo tanto sólo se estudian los sensores de distancia sin contacto.

A. Sensores de distancia sin contacto

Para medir distancia, desplazamiento o posición lineal sin contacto, es necesario un elemento de medida que no tenga transmisión convencional, por lo que en la actualidad, son los elementos que emplean el aire como medio de transmisión. Se trata de sistemas ópticos de medida y de sistemas acústicos de medida. En este campo los láseres y los ultrasonidos son los dos elementos principales.

B. Sensores láser

Un medidor de distancia láser funciona utilizando la medición del tiempo que tarda un pulso de luz láser en reflejarse en un blanco y volver al remitente. Esto se conoce como principio de "tiempo de vuelo" (ToF) y el método se conoce como medición de "tiempo de vuelo" o "pulso" [8]. Este principio se basa en el hecho de que la luz láser viaja a una velocidad bastante constante a través de la atmósfera de la Tierra. En el interior del medidor, una simple computadora calcula rápidamente la distancia al objetivo.

¿Por qué láser? Los láseres son rayos enfocados e intensos de luz, generalmente de una sola frecuencia. Son muy útiles para medir distancias porque viajan en forma justa a relaciones constantes a través de la atmósfera y viajan distancias mucho más largas antes de la divergencia (el debilitamiento y propagación de un rayo de luz) aumentando la eficacia del medidor.

C. Sensores de ultrasonido

Los sensores de distancia por ultrasonidos (US), son sensores compactos ideales para la medida de distancia o desplazamiento sobre materiales translúcidos, irregulares, pulidos, etc., aportando una salida proporcional al rango de distancia medido.

Los sensores ultrasónicos trabajan libres de roces mecánicos y detectan objetos a distancias que van desde pocos centímetros hasta varios metros. El principio más usado en estos sensores consiste en medir el tiempo de vuelo. Este tiempo de vuelo es el tiempo transcurrido entre la emisión y el retorno posterior después de la reflexión de un tren de pulsos de ultrasonido que viajan a la velocidad del sonido (aproximadamente 340 m/s en el aire). El sensor recibe el eco producido al chocar el sonido con un objeto y lo convierte en una señal eléctrica la cuál es utilizada para calcular la distancia entre el sensor y el objeto reflector.

Estos sensores se emplean en aplicaciones sin contacto ni rozamiento, donde la medida de distancia por láser también queda insuficiente, debido a que es necesario medir en superficies como cristal, plástico transparente, agua, fibra, espuma, etc. Todas estas superficies tienen en común que la medida óptica es errónea por el error de reflexión del láser.

D. Sensores infrarrojos

Los sensores infrarrojos (IR) son ampliamente utilizados como sensores de proximidad y para evitar obstáculos en robótica. Tienen una respuesta más rápida y

son de menor costo que los sensores US. Sin embargo, debido a su comportamiento no lineal y su dependencia de la reflexión de los objetos circundantes, las mediciones basadas en la intensidad de la luz IR retrodispersada son muy imprecisas para estimar el alcance. Por esta razón, el mapeo del entorno realizado con este tipo de sensor es de mala calidad, y los sensores IR son casi exclusivamente utilizados como detectores de proximidad en robots móviles. Sin embargo, algunos sensores IR se basan en la medición del desfase, y ofrecen una resolución media en distancias largas (unos 5 cm para distancias de hasta 10 m), pero en general, éstos son muy caros. [9]

E. Costo de sensores de distancia sin contacto

En la Tabla II se pueden ver los precios y características de algunos sensores de distancia sin contacto que ofrece el mercado.

TABLA II
COSTO Y CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS SENSORES DE DISTANCIA

Modelo	1. VL53L0X	2. GP2Y0A21YK0F	3. LIDAR-LITE V3	4. HC - SR04
Diseño				
Alcance (m)	2,00	0,10 a 0,80	40	0,02 a 4,00
Principio usado	Láser-ToF	IR-triangulación	Laer-ToF	US-ToF
Tamaño (mm)	4.4x2.4x1.0	29.5x13x13.5	20x48x40	45x20x15
Salida	Digital-I2C	Analógica	Digital-I2C	Digital
Precio	USD 5,46	USD 12	USD 150	USD 30
Fuente	Digi-Key	Digi-Key	Digi-Key	Digi-Key

ToF = Time of Flight, tiempo de vuelo, técnica de cálculo de distancia deducida de un tiempo de recorrido.

Para los sensores que aparecen en la Tabla II, a continuación se mencionan algunas de las aplicaciones más usuales.

1. Detección de usuario en computadoras personales, detección de obstáculos (robots), artículos de baño (dispensadores de jabón, grifos, etc.), reconocimiento de gestos, cámaras digitales para implementar el enfoque, etc. [10].
2. Interruptores sin contacto (equipamiento sanitario, control de luminarias, etc.), robots de limpieza, sensores para ahorro de energía, máquinas de juegos, etc. [11].
3. Sensor de proximidad y alcance fiable y potente para aplicaciones de drones, robots o vehículos no tripulados [12].
4. En robots principalmente. El funcionamiento no se ve afectado por la luz solar o material negro como si ocurre en los sensores ópticos (aunque acústicamente materiales suaves como telas pueden ser difíciles de detectar) [12].

V. SENSORES DE ACELERACIÓN (ACELERÓMETROS)

Un acelerómetro es un tipo de sensor inercial que puede medir la aceleración a lo largo de su eje sensible. El principio de funcionamiento más común de los acelerómetros se basa en un elemento sensor mecánico que comprende una masa de prueba unida a un sistema mecánico de suspensión, con respecto a un marco de referencia. La masa de prueba puede ser forzada a moverse por la fuerza inercial debido a la aceleración o gravedad según la segunda ley de Newton (fuerza = masa \times aceleración). Basándose en este principio, la aceleración se puede medir eléctricamente usando los cambios físicos en el desplazamiento de la masa de prueba, con respecto al marco de referencia.

Existen tres tipos comunes de acelerómetros, los *piezoeléctricos*, los *piezorresistivos* y los *capacitivos*. Los acelerómetros piezorresistivos y capacitivos pueden proporcionar dos componentes de aceleración y tienen una mayor estabilidad. Por lo tanto, estos tipos de acelerómetros son adecuados para medir el movimiento en la marcha humana. Al conectar estos acelerómetros a los pies o las piernas, se puede determinar su aceleración y velocidad para realizar el análisis de la marcha. [13]

A. Acelerómetros piezoeléctricos

Los acelerómetros piezoeléctricos utilizan el efecto piezoeléctrico de ciertos materiales para medir cambios dinámicos en variables mecánicas, tales como choque mecánico, vibración y aceleración. Están pensados para la medida de medias y altas frecuencias. Por su característica física, constan de un material piezoeléctrico que al ser manipulado mecánicamente proporciona una tensión muy pequeña, proporcional a ese movimiento.

Las principales cualidades de los acelerómetros piezoeléctricos residen en su amplio rango dinámico y bajo ruido de salida (adecuado para medición de choque así como para vibraciones casi imperceptibles), excelente linealidad sobre su rango dinámico, amplio rango de frecuencias, son compactos pero altamente sensibles, sin piezas móviles (sin desgaste), su autogeneración no requiere alimentación externa [14].

B. Acelerómetros piezorresistivos

El elemento sensor consta de una viga en voladizo y su masa de prueba. El movimiento de la masa de prueba debido a la aceleración puede ser detectado por piezorresistores ubicados entre la viga en voladizo y la masa de prueba. Los piezorresistores están dispuestos como un puente de Wheatstone para producir un voltaje proporcional a la aceleración aplicada. Los acelerómetros piezorresistivos son simples y de bajo coste. Los acelerómetros piezorresistivos son sensibles a la corriente continua, por lo que pueden medir aceleración constante como la gravedad. Los principales inconvenientes de la detección piezorresistiva son la sensibilidad a los cambios de temperatura y el bajo nivel de las señales de salida. [15]

C. Acelerómetros capacitivos

El desplazamiento de la masa de prueba se puede medir capacitivamente. En un mecanismo de sensado capacitivo, la masa sísmica está encapsulada entre dos

electrodos. La capacitancia diferencial es proporcional a la deflexión de la masa sísmica entre los dos electrodos. Las ventajas de los acelerómetros capacitivos diferenciales son el bajo consumo de energía, el gran nivel de salida y la rápida respuesta a los movimientos. También se consigue una mejor sensibilidad debido al bajo nivel de ruido de la detección capacitiva. Los acelerómetros capacitivos diferenciales también tienen respuesta en DC. Actualmente este tipo de acelerómetro ha sido ampliamente utilizado en la mayoría de las aplicaciones, especialmente en sistemas móviles y portátiles y electrónica de consumo.

D. Costo de acelerómetros

En la Tabla III se pueden ver los precios y características de algunos de los acelerómetros más comunes que ofrece el mercado.

TABLA III
COSTO Y CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS ACELERÓMETROS

Modelo	1. LIS2DE12	KXR94- 2050	2. SCA3100- D04	3. ADXL345
Diseño				
Voltaje de alim. (Vdc)	1.71-3.6	2.5-5.25	3-3.6	1.8-3.6
Rango de acel.	$\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$	$\pm 2g$	$\pm 2g$	$\pm (2/4/8/16)g$
Tipo	Capacitivo	Capacitivo	Capacitivo	Capacitivo
Ejes	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z	X, Y, Z
Tamaño (mm)	2x2x1	5x5x1.2	7.6x3.3x8.6	28x14
Salida	I2C/SPI digital	SPI	SPI	I2C/SPI
Precio (USD)	1.36	8.65	49	7
Fuente	Digi-Key	Digi-Key	Digi-Key	Aliexpress

Para los sensores numerados en la Tabla III se mencionan a continuación las aplicaciones más comunes en las que se los emplea.

1. Para funciones activadas por movimiento, orientación de displays, control de vibración, podómetros, dispositivos de entrada de juegos y de realidad virtual, reconocimiento y registro de impactos. [16]
2. Aplicaciones con altos requerimientos de estabilidad: freno de estacionamiento electrónico, detección de vuelco, control de suspensión, inclinómetros, mediciones de movimiento y posición. [17]
3. Dispositivos de juego y señalización, dispositivos de navegación personal, protección del disco duro, equipo de entrenamiento, cámaras digitales. [18]

VI. CONCLUSIONES PARA EQUIPOS MÉDICOS

Los sensores piezoeléctricos tienen una estructura pequeña y su alta frecuencia natural los hace idóneos para

aplicaciones dinámicas. Cuando se dispone de poco espacio y existen restricciones de instalación, resultan especialmente prácticos. Un sensor piezoeléctrico es hasta treinta veces más pequeño que uno de galga extensiométrica comparable, para un mismo intervalo de medición y con prestaciones similares.

La sensibilidad de un sensor piezoeléctrico normalmente no depende de su tamaño ni del volumen del cristal, sino del material empleado y de su geometría.

Un sensor pequeño, poco invasivo, por ejemplo, podría indicar demasiado trauma físico para un jugador de fútbol en tiempo real para evitar una lesión más grande. La miniaturización de los sensores piezoeléctricos permite que ahora se puedan entrelazar en tejidos, vendajes o prendas de vestir. Los sensores “hoja” por ejemplo, son flexibles, plegables y se pueden cortar para utilizarlos sobre o dentro de prendas de vestir o el calzado. Una plantilla para calzado, podría determinar si se está generando mucha presión en las pisadas hacia abajo para diagnosticar problemas en la espalda o las articulaciones.

La tecnología de galgas extensiométricas ofrece ventajas en términos de estabilidad a largo plazo, ya que con la tecnología de medición piezoeléctrica es prácticamente imposible crear una instalación de pruebas con una resistencia de aislamiento infinita.

En los sensores de galgas extensiométricas, el circuito de puente permite obtener una linealidad excelente. Esto evita la necesidad de compensar efectos de interferencias adicionales, como las variaciones de temperatura. Además esto hace a los sensores de galgas extensiométricas más adecuados para los trabajos de medición de alta precisión en bandas de carga parcial; por ejemplo, en el caso de los transductores de referencia.

Si se necesitan medir fuerzas estáticas o de baja frecuencia, se deben utilizar sensores basados en galgas extensiométricas.

En mediciones de distancia sin contacto, los sensores que utilizan tecnología láser o ultrasonido son los más precisos. En caso de hacer mediciones sobre materiales translúcidos, irregulares o pulidos, conviene utilizar los de ultrasonido ya que no se ven afectados por dichas características de los materiales.

Si bien los sensores de distancia por infrarrojo suelen ser menos precisos que los que usan tecnología láser, tienen la virtud de no ser dañinos para la vista. Esto los hace más seguros a la hora de utilizarlos en aplicaciones donde participan personas.

Los sensores ultrasónicos tienen dificultad para medir correctamente distancias a objetos suaves como telas. Por lo tanto se los debe evitar en aplicaciones donde existan estas superficies.

Respecto a los acelerómetros, para medidas a bajas frecuencias los capacitivos son la elección correcta por no introducir atenuación ni desfase en la señal. Además son los más económicos y abundantes en el mercado.

Los acelerómetros piezoeléctricos no responden a las componentes constantes de la aceleración.

Los acelerómetros piezorresistivos debido a su tecnología no necesitan electrónica sofisticada.

REFERENCIAS

- [1] M. Instrumentación and M. A. Torres, “Unidad Orientativa ‘ Sensores ‘ Sensores.” .
- [2] H. B. M. Test, “Force transducers based on strain gauges.” .
- [3] I. PCB Piezotronics, “General Piezoelectric Theory.” [Online]. Available: http://www.pcb.com/Resources/Technical-information/tech_gen.
- [4] M. Á. P. García, Instrumentación electrónica. Ediciones Paraninfo, SA, 2014.
- [5] M. Specialties, “Piezo Film Sensors Technical Manual,” Measurement, no. March. p. 57, 2006.
- [6] P. F. Sensors and H. Sensativity, “LDT with Crimps Vibration Sensor / Switch LDT with Crimps Vibration Sensor / Switch,” Response. pp. 1–4, 2008.
- [7] A. Burkhardt, Thomas; Feinäugle, Albert; Fericean, Sorin; Forkl, “Sensores de Desplazamiento y Distancia.” 2015.
- [8] I. Chapters and L. Detectionranging, “Ranging systems 8.1,” 2014, pp. 192–212.
- [9] G. Benet, F. Blanes, J. E. Simó, and P. Pérez, “Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots,” Rob. Auton. Syst., vol. 40, no. 4, pp. 255–266, 2002.
- [10] P. Computers, “VL53L0X World smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor: user manual,” no. May. pp. 1–26, 2016.
- [11] D. Measuring and S. Unit, “Gp2Y0a21Yk0F,” Control. pp. 1–9, 2006.
- [12] L. Lite and T. Specifications, “Table of Contents Lidar Lite v3 Operation Manual and Technical Specifications Wiring Harness.” pp. 1–14, 2016.
- [13] W. Tao, T. Liu, R. Zheng, and H. Feng, “Gait analysis using wearable sensors,” Sensors, vol. 12, no. 2, pp. 2255–2283, 2012.
- [14] V. Yanchich and O. Kramarov, “Piezoelectric Accelerometer,” US Patent 1974.
- [15] C. C. Yang and Y. L. Hsu, “A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring,” Sensors, vol. 10, no. 8, pp. 7772–7788, 2010.
- [16] I. Ios, E. Fifo, T. Lis, T. Lis, and T. Lis, “LIS2DE12 MEMS digital output motion sensor :,” no. May, pp. 1–48, 2015.
- [17] I. Knowledge, T. D. Sheet, and S. M. When, “Data sheet >,” no. july. pp. 1–5, 2002.
- [18] T. Mmaq, “Digital Accelerometer.” pp. 1–47, 2011.



A. Fernández Graña nació en la ciudad Aiguá, Maldonado, Uruguay, en 1988. En el 2006 terminó su bachillerato en la ciudad de San Carlos. En el 2007 ingresó a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República,

Uruguay, donde actualmente se encuentra cursando la carrera Ingeniería Eléctrica.

En su carrera su perfil es la electrónica, área en la cual se encuentra desarrollando su proyecto de fin de carrera.

En 2016, junto a dos compañeros más y en el marco de un curso de la Facultad de Ingeniería, publicó un informe sobre el desarrollo de un nuevo Protocolo de Ruteo para las Redes de Sensores Inalámbricos de Bajo Consumo (RPL).

En junio de 2017, también junto a dos compañeros más, publicó un informe sobre un método para medir el ángulo de inclinación de un objeto utilizando un microcontrolador de Texas Instruments y un módulo con acelerómetro y giroscopio.