

Implementación de un sistema para la medición de fuerza basado en el efecto piezorresistivo

Christian Moreno Rocha¹³, Andrés Medina Guzmán¹⁴, Adriana Herazo Pérez¹⁵
DOI: 10.33132/27114260.1996

Resumen

El medidor de fuerza presentado en el artículo está constituido básicamente por tres etapas. La primera (etapa sensor) consiste en el sensor piezorresistivo FlexiForce modelo A201, que fue escogido debido a sus múltiples propiedades físicas y de funcionamiento. En la segunda, a través de un circuito divisor de voltaje, se transformó la variación de resistencia del sensor piezorresistivo en una variación de voltaje. Debido a que los voltajes generados por el circuito divisor de voltaje eran pequeños, se resolvió utilizar un amplificador de instrumentación para amplificar dicha señal. Por último, la etapa tres abarca todo lo relacionado con la visualización de la medida que se va a realizar. Para lograr que la medida de fuerza se mostrara en la pantalla de una PC se diseñó un programa, mediante el *software* LabView, que muestra de manera gráfica y numérica el valor de la medida realizada y su correspondiente unidad.

Palabras clave: amplificador operacional, calibración, interfaz, piezorresistividad, sensor.

Introducción

En la actualidad hay tres sistemas elementales para la medición de fuerzas: los sensores piezorresistivos, los sensores piezoeléctricos y los transductores de fuerza con galgas extensométricas, como las células de carga.

13 Departamento de Energías, Universidad de la Costa (CUC). cmoreno7@cuc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-8902-7896>

14 Departamento de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de la Costa (CUC). amedina10@cuc.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-5463-6464>

15 Departamento de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de la Costa (CUC). aherazo@cuc.edu.co

En 1938, Arthur C. Ruge y Edward E. Simmons trabajaron independientemente y descubrieron que los conductores eléctricos de diámetro pequeño hechos de aleaciones podrían ser adheridos a superficies para calcular deformaciones, creando en este momento las galgas laminares. Este tipo de elemento ha tenido grandes avances y constituye lo que hoy se conoce como galgas extensiométricas (Wolf, 1992). En 1954, C. S. Smith descubre el efecto piezorresistivo en el silicio y en el germanio, semiconductores con una estructura de bandas altamente anisótropa. Aunque la variación de la resistencia en metales sometidos a esfuerzos mecánicos había sido previamente estudiada, el efecto piezorresistivo en estos semiconductores era mucho más intenso. En los metales la variación de la resistencia tiene un origen dimensional, pero en los semiconductores la variación principal se debe a un cambio en la resistividad, este cambio se define como el factor de Gauge (Valle-Lopera *et al.*, 2021). En mayo del 2007, Edwin Alzate, José Montes y Carlos Silva describen el principio de funcionamiento de un transductor para la medición de fuerza basado en la deformación causada por esfuerzos mecánicos: las galgas extensiométricas. Además, se establecen las formas de acondicionamiento, usan-

do diferentes configuraciones del circuito denominado puente de Wheatstone. Como aplicación se presentan los resultados de una balanza básica construida con una viga en voladizo a la cual se le han instalado cuatro galgas extensiométricas (Sun *et al.*, 2016). En octubre del 2013 Jorge Anzures, Ismael López y Reyes Ríos describen la metodología empleada para el diseño y la construcción de un sensor FSR que mida la fuerza y el torque que se aplica en la muñeca del robot manipulador KUKA Youbot. Este es capaz de describir en qué dirección proviene la fuerza ya que contara con seis grados de libertad (Anzures, 2013).

El objetivo de esta investigación es diseñar, construir y calibrar un medidor de fuerza, de bajo costo, basado en el efecto piezorresistivo.

Desarrollo experimental

La construcción del medidor de fuerza siguió las etapas mostradas en la figura 1.

Sensado

Pieza mecánica

Para un buen funcionamiento del sensor piezorresistivo toda la fuerza aplicada debe concentrarse únicamente en el área activa y siempre en el mismo

Los terminales externos del sensor están conformados por tres conectores machos, en que los pines del borde son activos y el pin central es inactivo. Algunas especificaciones básicas del sensor FlexiForce pueden observarse en la tabla 1.

Acondicionamiento de señal

Convertidor de fuerza a voltaje

Como se mencionó, el sensor FlexiForce A201-25 se comporta como una resistencia variable. Esta variación de resistencia en inversamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, cuando el sensor es sometido a alguna fuerza su resistencia eléctrica disminuye y cuando está libre de fuerzas su resistencia eléctrica es muy alta.

Tabla 1. Especificaciones físicas y de rendimiento del sensor FlexiForce

Sensor FlexiForce modelo A201	
Espesor	0,203 mm
Longitud	197 mm, 152 mm, 102 mm, 51 mm
Ancho	14 mm
Áte de detección	9,53 mm de diámetro
Conector	3- pines macho
Error de linealidad	< ± 3 %
Tiempo de respuesta	< 5 μs
Rangos de fuerza	0 -1 lb, 0,25 lb, 0-100 lb
Temperaturas de funcionamiento	-40 °C a 60 °C

Fuente: elaboración propia.

Teniendo lo primero presente, el siguiente paso es convertir esta variación de resistencia en una variación de voltaje, considerando que esta variación de voltaje tiene que ser directamente proporcional a la fuerza aplicada al sensor. Esto se consiguió conectando el sensor FlexiForce A201-25 en serie con una resistencia de valor fijo, formando así un circuito divisor de voltaje (figura 4).

En el circuito mostrado en la figura 4 se observa una clara conversión de fuerza a voltaje, y que el voltaje de salida depende únicamente del cambio en la resistencia del sensor FlexiForce, ya que la resistencia R_F tiene un valor fijo. A medida que la resistencia eléctrica del sensor R_S sea menor el voltaje sobre la resistencia R_F será mayor, el amplificador operacional en configuración de seguidor de voltaje es utilizado para medir el voltaje sobre la resistencia R_F . La función del seguidor de voltaje en esta configuración es amortiguar la salida para que la carga o lo conectado en V_{out} reciba el voltaje que necesita, los seguidores de tensión son importantes para aislar un circuito de modo que no retire potencia

La ecuación para el voltaje de salida del circuito mostrado en la figura 4 es:

$$V_{out} = \frac{V_{in}R_F}{R_F+R_S} = \frac{V_{in}}{1+\frac{R_S}{R_F}} \quad (1)$$

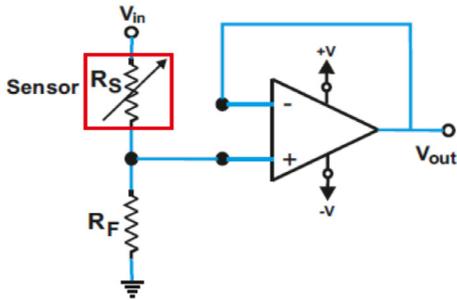


Figura 4. Circuito divisor de voltaje para el sensor FlexiForce A201-25
Fuente: elaboración propia.

El circuito “convertidor de fuerza a voltaje” que finalmente se empleó es el mostrado en la figura 5. El valor de la resistencia R_F (20 k) se escogió de tal forma para que el voltaje de salida tuviera la mejor respuesta lineal y por criterios de diseño, el valor de V_{in} fue de 5 V (escogido por criterios del fabricante) y el amplificador operacional utilizado fue el AD712JN.

Amplificador de instrumentación

Un amplificador de instrumentación es un circuito con entrada diferencial cuya función principal es amplificar con precisión las señales de muy bajo nivel aplicadas a su entrada. Se escogió este tipo de amplificador ya que es perfecto para hacer acondicionamientos de señales, es muy preciso y puede ser calibrado fácilmente. El amplificador de instrumentación está conformado básicamente

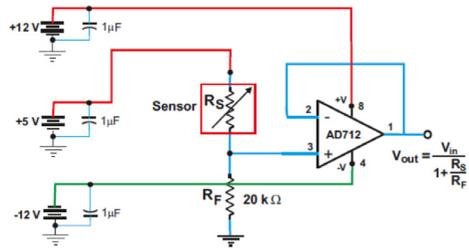


Figura 5. Circuito convertidor de fuerza a voltaje para el sensor FlexiForce A201-25
Fuente: elaboración propia.

por una resistencia variable, seis resistencias del mismo valor y tres amplificadores operacionales, cabe mencionar que la ganancia y el voltaje de salida se gradúan únicamente a través de la resistencia variable. En la figura 6 se muestra el circuito que finalmente se utilizó para la construcción del amplificador de instrumentación.

El voltaje de salida del amplificador de instrumentación se proyectó para que tuviera un rango de 0 a ≈ 10 V (como máximo), esto se hizo con el fin de conectar dicha salida a una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008.

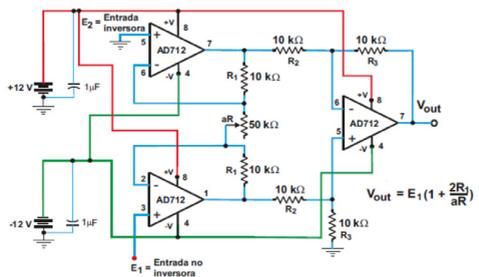


Figura 6. Amplificador de instrumentación utilizado para el acondicionamiento de señal
Fuente: elaboración propia.

Visualización

Interfaz electrónica

Como ya se había mencionado, en esta etapa se utilizó una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008 con el objetivo de poder conectar el circuito creado en la etapa de acondicionamiento con una PC (figura 7). La NI USB-6008 se utilizó para este proyecto debido a su disponibilidad y además porque es una herramienta muy útil en el campo de la instrumentación electrónica, ya que cumple la función de convertidor análogo-digital y de interfaz acopladora.

Visualización de datos

En esta última etapa se utilizó el *software* LabView 10 para la visualización de los datos provenientes de la NI USB-6008. Básicamente, el *software* LabView es una herramienta gráfica, esto

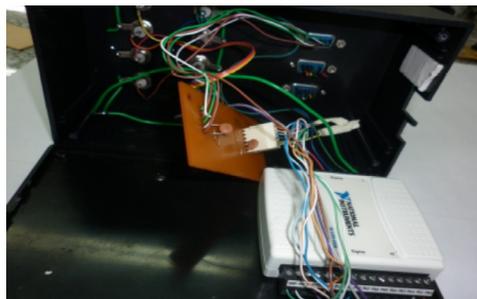


Figura 7. Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6008

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Especificaciones básicas de la NI USB-6008

NI USB-6008	
Canales de una sola terminal	8
Canales diferenciales	4
Resolución	12 bits
Velocidad de muestreo	10 K S/s
Rendimiento (todos los canales)	10 K S/s
Rango de voltaje máximo	10 V, 10 V
Precisión máxima del rango de voltaje	138 mV
Rango de voltaje mínimo	-1 V, 1 V
Mínima precisión del rango de voltaje	37,5 mV
Memoria interna	512 VB

Fuente: elaboración propia.

significa que los programas permiten graficar facilitando su comprensión. Al tener prediseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto. La principal característica de este *software* es la facilidad de uso, apropiado para programadores expertos como para personas con poco conocimiento en programación.

Los programas desarrollados mediante LabView se llaman instrumentos virtuales, porque su aspecto y funcionamiento se parecen a los de un instrumento real. Todos los instrumentos virtuales tienen un panel frontal (interfaz gráfica del instrumento virtual con el usuario) y un diagrama de bloques (código fuente). Las paletas (íconos) contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los instrumentos virtuales.

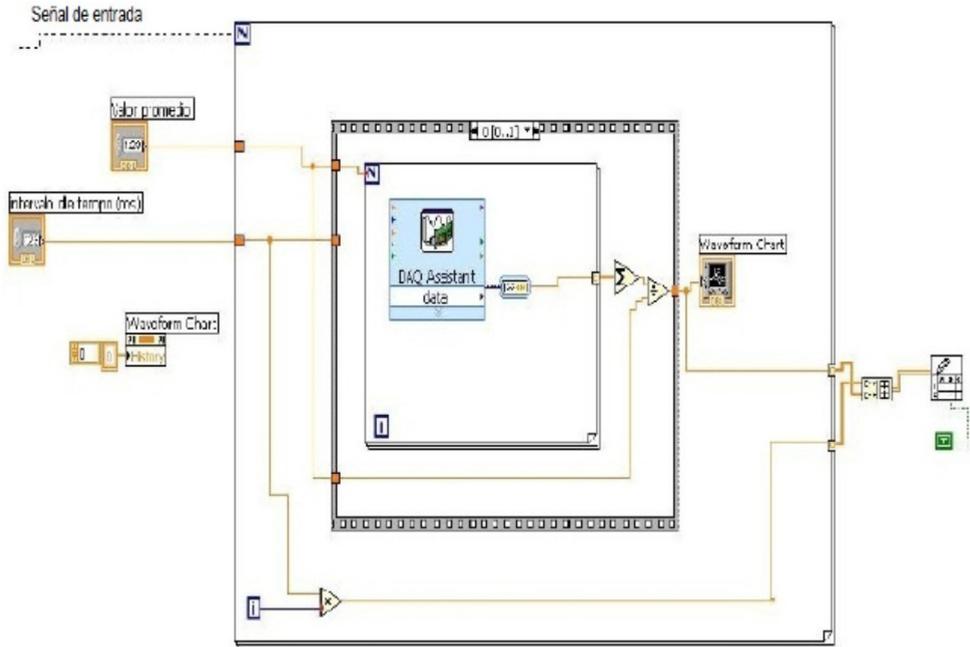


Figura 8. Código fuente del programa utilizado para la visualización de datos

En la figura 8 se muestra el código fuente que se diseñó y finalmente se utilizó para la visualización de los datos.

Toma y análisis de resultados

Para la realización y culminación de esta etapa fueron necesarios algunos materiales e instrumentos, que sirvieron como herramientas para la calibración y el buen funcionamiento del medidor de fuerza.

La variación de resistencia del sensor piezorresistivo FlexiForce se logró mediante una serie de objetos con diferente masa; cabe mencionar que la masa de dichos objetos se determinó a través

de una balanza digital Premier Ed-1035, con rango de medida de 0 a 30 kg (figura 9). Se decidió utilizar esta balanza digital debido a su disponibilidad, ya que fue recientemente adquirida. Es importante referir que dichos objetos (masas) se pesaron y fueron colocados sobre el sensor piezorresistivo de tal manera que la única fuerza que los afectara fuera la fuerza de atracción de la tierra (gravedad local), cuyo valor estándar es de $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$.

Respuesta del sensor FlexiForce

Para cada valor de masa se realizaron de manera aleatoria diez medicio-

nes de resistencia, cada una con aproximadamente un minuto de diferencia, dicho valor de resistencia fue registrado por medio de un multímetro digital GDM-396. Según el fabricante, el peso máximo aplicable al sensor es de 25 lb (11,3398 kg), por lo que se tuvo cuidado de no sobrepasar dicho valor para evitar daños al sensor. Es importante mencionar que el sensor fue colocado sobre una pequeña lámina de fibra de vidrio, esto con el objetivo de garanti-

zar que el sensor estuviera en una superficie totalmente plana en el momento de aplicarle el peso (fuerza) sobre el área activa.

A continuación, se muestra en la figura 10 la resistencia vs. masa obtenida. El valor de resistencia mostrado es el promedio de diez mediciones. La masa del rectángulo y disco plástico utilizados para concentrar todo el peso en el área activa del sensor se consideró como despreciable, ya que al estar ambos encima de la balanza digital esta no registraba ninguna lectura.

Realizando la conversión de masa a fuerza, la figura anterior queda de la siguiente forma:

Al realizar la figura de fuerza vs. conductancia ($1/R$) (figura 12), se puede observar que la curva presenta una



a)



b)

Figura 9

a) Objetos utilizados para lograr la variación de resistencia del sensor piezorresistivo

b) Balanza digital Premier Ed-1035

Fuente: elaboración propia.

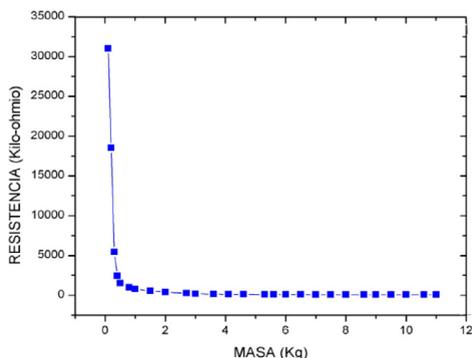


Figura 10. Resistencia vs. masa obtenida a partir del sensor piezorresistivo FlexiForce A201-25

Fuente: elaboración propia.

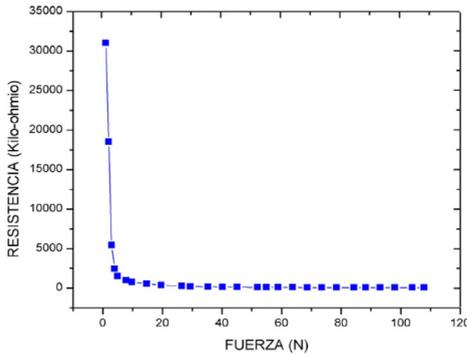


Figura 11. Resistencia vs. fuerza obtenida a partir del sensor piezorresistivo FlexiForce A201-25

Fuente: elaboración propia.

tendencia lineal. El hecho de que la conductancia tenga una relación lineal con la fuerza aplicada al sensor, representa un evento favorable para la construcción del medidor de fuerza, ya que de esta forma se simplifican los pasos a la hora de calibrar el dispositivo.

Nota: al mirar la figura se puede apreciar la tendencia lineal que existe

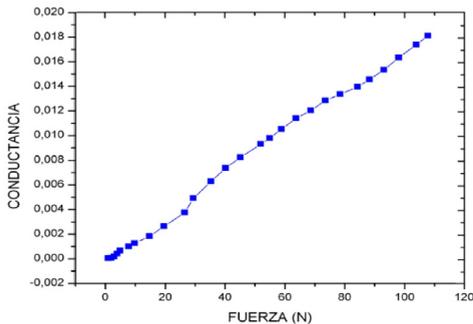


Figura 12. Conductancia vs. fuerza

Fuente: elaboración propia.

entre la conductancia (1/R) y la fuerza aplicada.

La figura 12 muestra que la conductancia (1/R) tiene un comportamiento lineal; para evaluar este parámetro se realizó una regresión lineal la cual está determinada por la ecuación 2, basada en el método de mínimos cuadrados.

$$\overline{y} = a_0 + a_1x \quad (2)$$

Donde

$$a_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{n \sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (4)$$

\overline{x}_i = variable física (fuerza).

\overline{y}_i = variable medida (resistencia).

\overline{n} = número de mediciones efectuadas.

Al aplicarse esta fórmula se obtuvo como resultado la recta descrita por la ecuación 5 (figura 13).

$$\overline{y} = -1,73403 \cdot 10^{-4} + 1,72101 \cdot 10^{-4}x \quad (5)$$

Para el cálculo del porcentaje de linealidad se utiliza el coeficiente de correlación, el cual está dado por la ecuación 6:

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (6)$$

De la ecuación 6, por lo tanto, se desprende una linealidad del 98,675%.

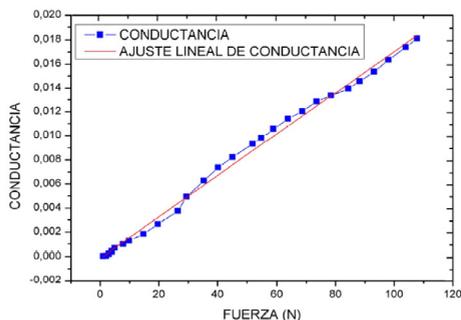


Figura 13. Ajuste lineal de la figura de conductancia vs. fuerza a partir del método de mínimos cuadrados

Fuente: elaboración propia.

Nota: valores por encima de 111 N causan daños permanentes al sensor.

Acondicionamiento de señal Comportamiento del convertidor de fuerza a voltaje

Como se mencionó, la conversión de fuerza a voltaje se logró mediante el circuito mostrado en la figura 5. Al analizar la ecuación 1, nos damos cuenta de que la variación del voltaje de salida depende básicamente del valor de resistencia del sensor (R_S), ya que voltaje de alimentación (V_{in}) y la resistencia fija (R_F) son constantes. Pero el hecho de que el voltaje de salida presente un comportamiento lineal también depende del valor de la resistencia R_F .

La figura 14 muestra voltaje vs. fuerza, del circuito conversor de fuerza a voltaje, obtenida a partir de diferentes valores de resistencia R_F .

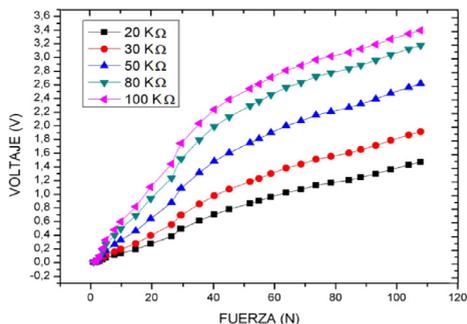


Figura 14. Voltajes de salida del circuito convertidor de fuerza a voltaje para varios valores de resistencia R_F

Fuente: elaboración propia.

A partir de estos resultados se decidió que el valor de R_F fuera de $20\text{ K}\Omega$, ya que con este valor de resistencia el circuito convertidor de fuerza a voltaje presenta una mejor respuesta lineal. Para resistencias por debajo de $20\text{ K}\Omega$ se obtienen valores de voltajes muy pequeños, lo que causa indistinguibilidad de una medida con otra y hace muy tedioso el trabajo.

Amplificación

Para amplificar la señal eléctrica proveniente del circuito convertidor de fuerza a voltaje se utilizó el amplificador de instrumentación mostrado en la figura 6.

La figura de voltaje vs. fuerza que se obtuvo al realizar el acople del circuito convertidor de fuerza a voltaje con el amplificador de instrumentación se muestra en la figura 15.

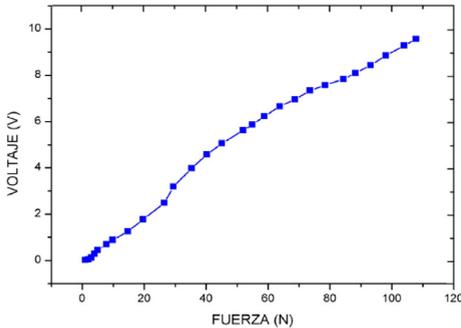


Figura 15. Voltajes de salida obtenidos en la etapa de acondicionamiento
Fuente: elaboración propia.

Curva de calibración

Al realizar una regresión lineal (a partir del método de mínimos cuadrados) de los datos presentados en la figura 15, se obtuvo como resultado la recta descrita por la ecuación 6 (figura 16).

$$\underline{V = 0,2081 + 0,092624 \cdot F} \quad (6)$$

Donde

V = voltaje de salida.

F = fuerza aplicada.

La ecuación 6 relaciona la variable medida y la señal generada. Para lograr determinar la magnitud de una fuerza desconocida a partir de la señal eléctrica generada por nuestro sistema de medida (circuito), procedemos a despejar el valor de F de la ecuación 6 (figura 17).

$$\underline{F = 10,79 \cdot V - 2,246} \quad (7)$$

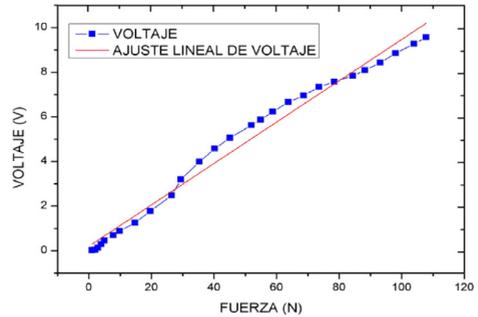


Figura 16. Ajuste lineal de la figura voltaje vs. fuerza a partir del método de mínimos cuadrados
Fuente: elaboración propia.

La ecuación 7 está lista para ser utilizada en la determinación de fuerzas desconocidas que se apliquen sobre el área activa del sensor. El hecho de que pueda haber valores de fuerzas negativos (a causa del intercepto) nos está indicando que los valores en los que $\underline{10,79 \cdot V \leq 2,246}$ no son confiables, ya que el sistema no está diseñado para medir fuerzas negativas, es decir que se empiezan a obtener valores confiables de fuerzas cuando $\underline{10,79 \cdot V > 2,246}$.

Mejoras y recomendaciones

El sistema mostrado también puede ser utilizado para medir la presión a la que se encuentra un fluido. Ya que el sensor piezorresistivo necesita que se produzca algún contacto (de forma física) con el área activa para registrar una lectura, lo único que hay que hacer

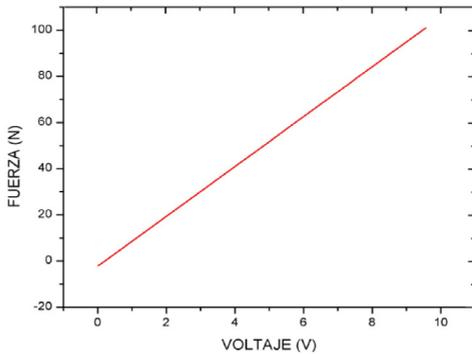


Figura 17. Recta de calibración obtenida a partir de la ecuación 7

Fuente: elaboración propia.

es transformar esta presión del fluido en una fuerza de contacto. Esto se consigue a través de un pistón (figura 18). El pistón transforma la presión a la que se encuentra el fluido en una fuerza que es proporcional a esta, y al llevar esta fuerza al área activa del sensor se consigue

una lectura aproximada de la presión a la que se encuentra el fluido.

En el caso de que se requieran medidas de presión más precisas (para un fluido), será necesaria una recalibración del equipo, considerar factores como la masa del pistón y la fricción existente entre el pistón y las paredes del cilindro.

Conclusiones

Como resultado de esta investigación se puede concluir que la utilización de sensores piezorresistivos para la construcción de un sistema medidor de fuerza parece ser una buena opción. Debido a que estos tienen una gran ventaja con respecto a otros sensores (capacitivos, piezoeléctricos, resistivos, etc.), tales como: amplio rango de medida, alta

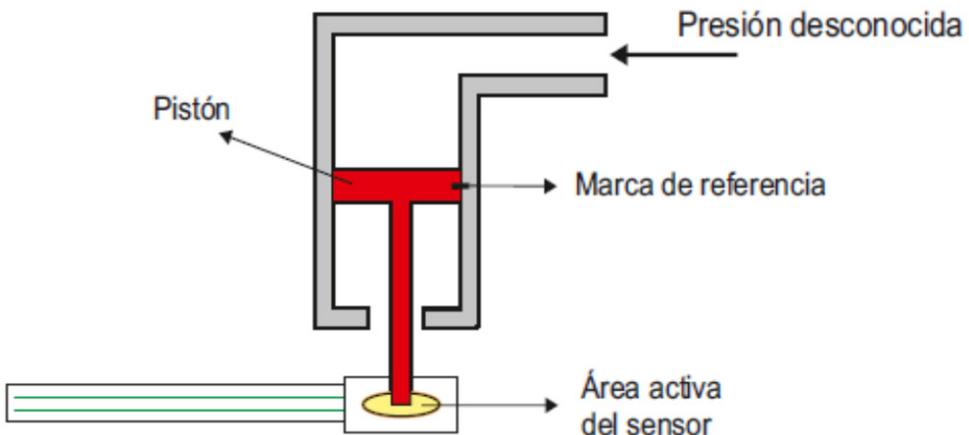


Figura 18. Sistema empleado para la medida de presión en fluidos

Fuente: elaboración propia.

capacidad de detección, estabilidad en la señal de salida, fácil acondicionamiento de la señal, poca dependencia de la temperatura externa, su funcionamiento no se ve afectado frente a la presencia de campos eléctricos o magnéticos, entre otros, además el circuito recomendado por el fabricante del sensor piezorresistivo FlexiForce evidentemente puede ser utilizado para la construcción de un medidor de presión o en su defecto un medidor de fuerza, pero las mediciones efectuadas a partir de este, solo podrían dar resultados cualitativos del sistema de medida, por otro lado, debido a que se utilizó una balanza digital Premier Ed-1035 para determinar el valor de masa de las pesas utilizadas en la calibración del sistema, las medidas registradas por el medidor de fuerza están sujetas de cierto modo a la veracidad de los datos producidos por la balanza digital.

Referencias

- Anzures Gómez, J. (2021). Diseño y Construcción de un sensor de Fuerza y Torque de bajo costo para un Robot KUKA Youbot. Conference: Primer Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas CIICA. https://www.researchgate.net/publication/299437260_Diseño_y_Construcción_de_un_sensor_de_Fuerza_y_Torque_de_bajo_costo_para_un_Robot_KUKA_Youbot.
- French, P. J. y Dorey, A. P. (1983). Frequency output piezoresistive pressure sensor. *Sensors and Actuators*, 4, 77-83.
- Gutiérrez, I. (2020). *Diseño y construcción de un equipo de adquisición de datos para la determinación del módulo de elasticidad y relación de poisson en materiales rocosos* [trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28110/2020luis-agutierrez.pdf?Sequence=3>
- Hollinger, A. (2021). Evaluation of commercial force-sensing resistors. https://www.researchgate.net/publication/265922252_Evaluation_of_Commercial_Force-Sensing_Resistors.
- Kester, W., Bryant, J. y Jung, W. (2020). Amplifiers for signal conditioning. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Practical-Design-Techniques-Sensor-Signal/Section3.PDF>
- Quintero, C. (2011). *Instrumentación electrónica aplicada: prácticas de laboratorio*. Universidad del Norte.
- Sun, J., Ye, S., Wang, L., Zhang, J. y Kho, H. (2016). Informe sobre comparación bilateral NIM-NMC: comparación de calibración SPRT de $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $420\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Metrología*, 53(1A).
- Valle-Lopera, D. A. Castaño-Franco, A. F., Gallego-Londoño, J., Hernández-Valdivieso, A. M. (2017). Test and fabrication of piezoresistive sensors for contact pressure measurement. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 47(82), 47-52.
- Wolf, S. M. (1992). Toward a theory of process. *Law, Medicine & Health Care: A Publication of the American Society of Law & Medicine*, 20(4), 278-290.