

Sistema Automático Basado en FPGA para la Caracterización de Sensores de Fuerza

FPGA-based Automatic System for the Characterization of Force Sensors

José Francisco Estrada Segura¹, Carlos Rodríguez Doñate², Ruth Ivonne Mata Chavez³

¹Departamento de Estudios Multidisciplinarios de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato
jf.estradasegura@ugto.mx c.rodriguezdonate@ugto.mx ruth@ugto.mx

Resumen

En la actualidad los sensores de fuerza son utilizados en gran variedad de aplicaciones de uso cotidiano, como médicas, industriales, entre muchas más. Por esta razón, el proceso de calibración de los sensores de fuerza es sumamente importante ya que de esto dependerá la precisión de la medición que se realiza. En este sentido, la propuesta de este trabajo consiste en el diseño de un prototipo que permitirá caracterizar sensores de fuerza de manera automática. El sensor utilizado como referencia se basa en una galga extensiométrica la cual puede ser intercambiada para tener mediciones máximas de 1kg, 5 kg o 10 kg. La automatización del sistema se realiza mediante una interfaz gráfica diseñada en Matlab que interactúa con el sistema implementado en el FPGA donde se diseñó e implemento el controlado para el motor a pasos, el controlador para el HX711 que se encarga de adquirir la señal de sensor, el sistema de adquisición de datos y el protocolo de comunicación RS-232. Se observa que al enviar un pulso de trabajo en la resolución más alta del controlador (1/16 de paso) se tiene una presión de 6.59 gr, 6.69 gr y 5.28 gr con los sensores de 1 kg, 5 kg y 10 kg respectivamente y la distancia mínima de trabajo del prototipo de 3.5211267605633 μm .

Palabras clave: Galga Extensiométrica, Automatización, FPGA.

Introducción

Los sensores de fuerza son utilizados comúnmente en ámbitos industriales, de investigación y médicos, estos tienen gran variedad de aplicaciones debido a su comportamiento el cual resulta útil para implementar alguna tarea relacionada con cierto tipo de movimiento mecánico, por ejemplo, para asociar el valor de salida de un sensor con un fenómeno físico como el torque y potencia de un motor de combustión (Castillo, Rojas, & Martínez, 2017). Por ejemplo, la rehabilitación humana es un campo de la investigación, que en las últimas décadas se ha beneficiado por el desarrollo de sistemas mecatrónicos y en particular de la electrónica. Como las propuestas de los trabajos presentados por (A. Díez, *et al.*, 2018), (Flores Cautle, Sandoval Gonzalez, & Trujillo Romero, 2020), donde utilizan un exoesqueleto que se desarrolla para prótesis humanas para conocer el valor exacto de la presión que se ejerce, lo que permite tener buen desempeño del sistema mecatrónico, de igual forma con este tipo de sensores se ha podido inferir el avance de la rehabilitación de los pacientes al realizar sus terapias físicas. Los sensores de presión también se han utilizado en estudios de la posturografía para ayudar a personas a determinar si su cuerpo se encuentra en buenas condiciones o requiere de tratamiento preventivo, por lo que se puede inspeccionar el avance de algún paciente con alguna enfermedad o problema en su postura (Bellini, 2009).

Por otro lado, la deformación es uno de los fenómenos que se ven comúnmente en estructuras físicas donde se han utilizado galgas extensiométricas para pruebas en las cuales existe una deformación. Al analizar la señal de salida de los sensores se puede interpretar el funcionamiento del sistema y determinar que sucede (Ortuño Lizano, 2018). Se han implementado galgas extensiométricas para determinar la fuerza de corte de un mini torno mecánico cortando acero SAE 1020, posicionando las galgas con material adhesivo en lugares estratégicos. (Geancarolo, 2017). En el trabajo presentado por (Oliveira & Fujiwara, 2023), se propone un sensor de fuerza utilizando fibras ópticas donde se requiere de un proceso de calibración, ya que dependiendo de la presión ejercida sobre el sensor se reflejará un cambio en la intensidad luminosa que pasa por la fibra la cual se mide con una cámara de carga acoplada (CCD). Por lo tanto, es de suma importancia contar con



equipos que permitan medir con precisión la presión de forma controlada, esto con la finalidad de poder realizar el análisis y caracterización de este tipo de sensores.

En este trabajo se propone un prototipo que permitirá la caracterización de sensores de fuerza (Galgas extensiométricas) de manera automatizada con un sistema embebido en FPGA. Por lo tanto, el prototipo tiene la capacidad de reconfigurarlo de forma automática con una presión mínima de 6.59 gramos la cual se puede incrementar de forma gradual hasta llegar a una presión máxima de aproximadamente 3.20 Kg.

Propuesta del prototipo

Para poder caracterizar un sensor de fuerza es necesario tener control de la fuerza aplicada con la mayor precisión posible. Por lo tanto, para lograr el objetivo de este trabajo en la figura 1 se presenta el esquema general del prototipo el cual se realizó en tres etapas: diseño mecánico, instrumentación y automatización.



Figura 1. Diagrama a bloques de las etapas de proyecto de investigación,
Fuente: Elaboración propia.

La primera etapa consistió en el diseño mecánico del prototipo y se realizó tomando en cuenta todos los factores mecánicos que serán de utilidad al momento de obtener un prototipo que cumpla con las características necesarias para definir sus funciones. Por lo tanto, para tener control del movimiento mecánico del prototipo se utilizó un motor a pasos con un tornillo sin fin, ya que de esta forma se puede controlar con muy alta precisión el desplazamiento mecánico para conocer la presión aplicada en el sensor de presión que servirá de referencia. En la figura 2 (a) se muestran el motor a pasos nema-17 (Pololu, 2015) con el tornillo sin fin, la chumacera y soporte y en la figura 2 (b) se muestran las guías con un riel con lo cual se reduce la fricción entre la base y el eje del motor. Entre las principales características del motor es que cuenta con un ángulo de paso de 1.8° , fuerza radial máxima de 28N y fuerza máxima axial de 10N. Para poder controlar este motor se utilizó el controlador a4988 (Pololu, 2015) de la marca Pololu ya que permite modificar de forma digital los pasos del motor logrando tener control desde un 1/16 de paso. El diseño mecánico del prototipo que se muestra en la figura 3 se realizó con el software Solid Works, este diseño tiene las medidas de los componentes físicos que se mostraron en la figura 2 (c), con lo que se permite tener un diseño donde se pueden realizar los ajustes que se requieren para poder montar el prototipo.

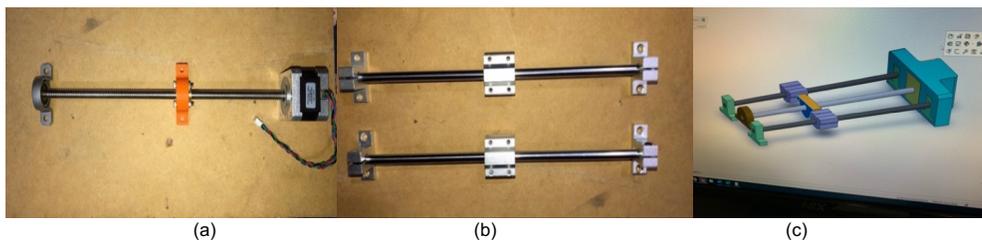


Figura 2. Diseño mecánico del prototipo, (a) motor a pasos, chumacera y base con rodamiento, (b) guías lineales con riles y soportes, (c) Diseño Propuesto en el software de Solid Works,
Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de esta etapa se imprimió el prototipo en una impresora 3D con material PLA, con lo que se pudo observar el funcionamiento del motor, ensamble de los elementos, las deformaciones que se generan al realizar el desplazamiento de los elementos, por lo tanto, se utilizó aluminio para hacer el diseño final del prototipo a partir del diseño en el Solid Works. En la figura 3 (a) y (b) se muestra el prototipo impreso con PLA y aluminio, respectivamente.

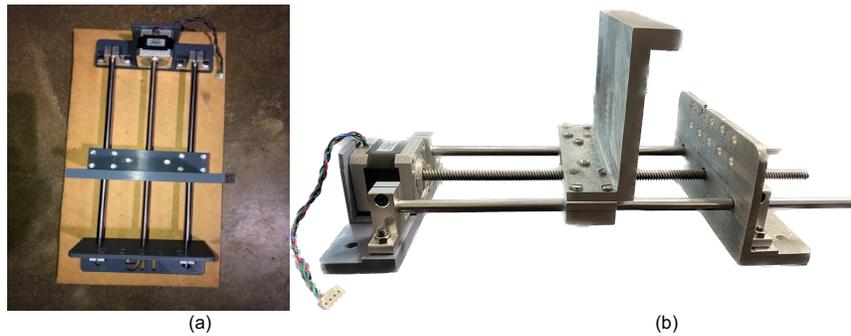


Figura 3. Prototipo mecánico (a) impreso en PLA, (b) aluminio.
 Fuente: Elaboración propia.

EL prototipo se instrumentó con una galga extensiométrica, este sensor de peso o célula de carga es considerado como una versión especial de los transductores de fuerza usados para propósitos de pesaje. Comúnmente estos están basados en un principio de funcionamiento por medio de galgas extensométricas en su interior. Estas galgas extensométricas son conductores eléctricos unidos a una película que siguen un determinado patrón (figura 4 (a)), por lo que la resistencia del sensor presentará cambios dependiendo de la fuerza que sea aplicada; la figura 4 (b) muestra la galga extensiométrica que se utilizó, ya que en base a su diseño permite montarla al prototipo con facilidad (Mv electrónica, 2023). Por otro lado, para poder adquirir la señal de este sensor se utilizó el módulo HX-711 (A-Electronic's, 2022) el cual se muestra en la figura 4 (c); este circuito cuenta con un convertidor analógico – digital (ADC) de 24 bits de resolución, con un voltaje de 0 volts como mínimo y 5 volts como máximo.

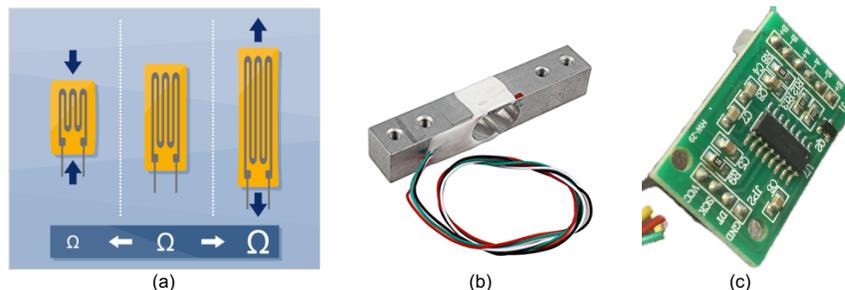


Figura 4. Galga extensiométrica, (a) la deformación en la galga se considera positiva si el material se estira (resistencia aumenta) y negativa si se comprime (resistencia se reduce), (b) Celda de carga de plataforma. (c) driver de sensor HX711, Fuente (a): (Geancarlo, 2017), Fuente (b)(c): Elaboración propia .

Finalmente, en la figura 3 se muestra la forma en la cual se hace la automatización del prototipo, donde la etapa de software se realizó en la PC mediante el software Matlab y la etapa de hardware se implementa con un dispositivo de compuertas programables en campo (FPGA). La interacción entre el software y el hardware se realiza mediante el protocolo de comunicación RS-232.

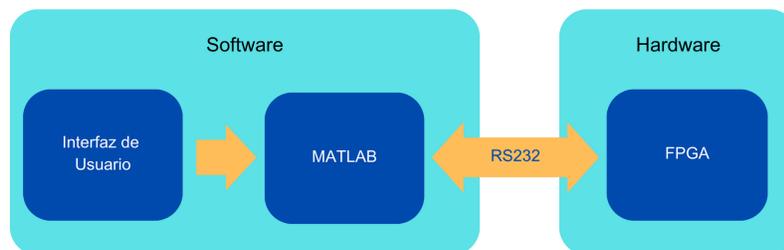


Figura 5. Diagrama general de la automatización del prototipo,
 Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar la reconfiguración del prototipo se diseñó una interfaz gráfica de MATLAB la cual se muestra en figura 6. En la interfaz gráfica y en el apartado “Configuración del motor” se encuentran dos menús, el primero se determina la resolución de trabajo del motor (paso completo, 1/2 de paso, 1/4 de paso, 1/8 de paso, y 1/16 de paso) y la segunda permite elegir si el desplazamiento será hacia adelante o hacia atrás. En la sección “Tipo de funcionamiento” se elige entre el funcionamiento manual y funcionamiento automático. Por lo tanto, para el funcionamiento manual se cuenta con un botón de “inicio manual” por el cual se habilitará el campo para el número de pulsos que se quiere enviar para que el motor pueda trabajar y de esta forma se podrá dar clic al botón de “inicio manual”. Por otro lado, el funcionamiento automático habilitará el menú “Recorridos establecidos” donde primero se deberá elegir la resolución a la que trabajará el motor y después se deberá elegir alguno de los recorridos por defecto con los que cuenta el prototipo. Posteriormente, se elige el sensor que se utilizará (1 Kg, 5Kg y 10 Kg) en la sección “Sensor Montado” para que de esta forma se pueda realizar el proceso de calibración de forma automática con el botón “calibración del sensor”, es importante que al momento de realizar la calibración se fije la pieza central del prototipo tocando el sensor. Una vez que el prototipo tiene los datos de operación y dio inicio su operación se puede presionar el botón “lectura de datos” con el cual se solicitará la información que estuvo almacenando el sistema de adquisición de datos mientras el prototipo realizó la prueba. Finalmente en el apartado de adquisición de datos se puede editar la frecuencia de muestreo de la adquisición y el número de muestras.

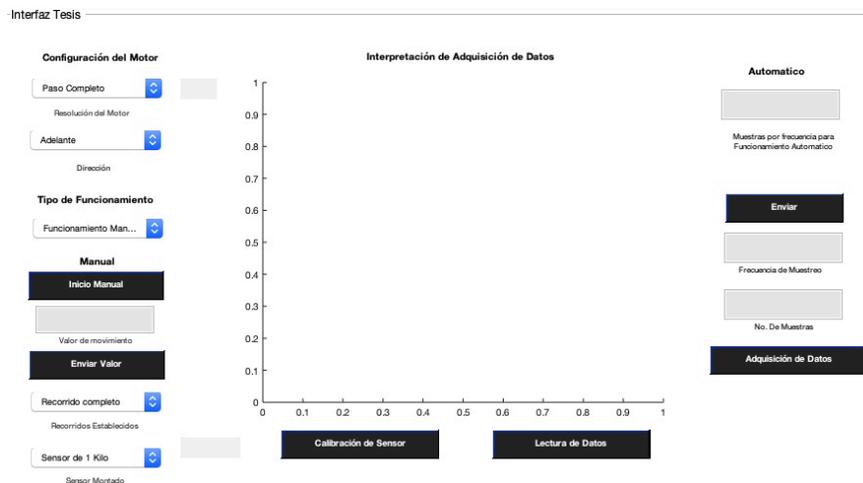


Figura 6. Diagrama de manejo de la información entre PC y placa FPGA,
Fuente: Elaboración propia.

La arquitectura diseñada para el FPGA se muestra en la figura 7. Este dispositivo cuenta con un bloque de adquisición de datos, un bloque de decodificación de la adquisición de datos, un bloque de comunicación para el protocolo RS-232, un bloque para el controlador HX-711 y por último un bloque para el controlador del motor a pasos. Por lo tanto, la configuración que se envía desde la interfaz de Matlab llega al bloque RS232 y es enviada hacia el bloque DECRS-232 que se encarga de interpretar la información para reconfigurar el sistema. Por otro lado, el sistema de adquisición de datos se encarga de almacenar la información que envía el módulo HX-711 y sincronizar el avance del motor, además de enviar la información hacia la interfaz de Matlab.

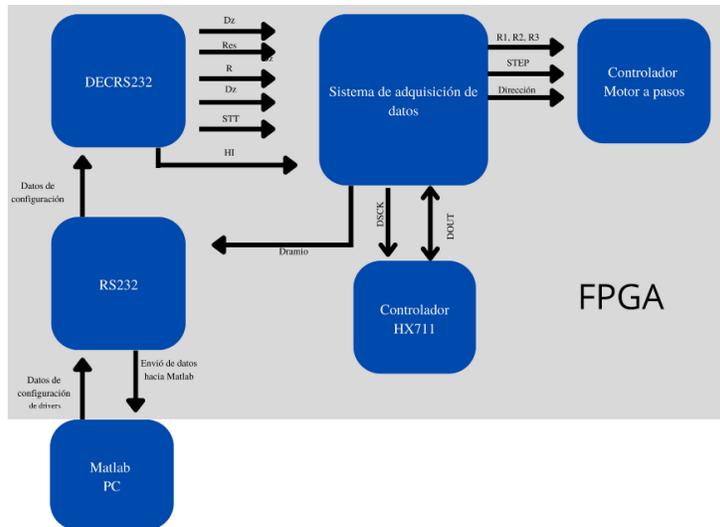


Figura 7. Diagrama de componentes internos del código de la placa FPGA,
 Fuente: Elaboración propia.

Resultados

La figura 8 muestra cada uno de los elementos del prototipo con lo cual se realizaron las pruebas experimentales. La implementación de los diseños digitales se realizó en el kit DE-1 que cuenta con un FPGA Cyclone II (Intel, 2022).

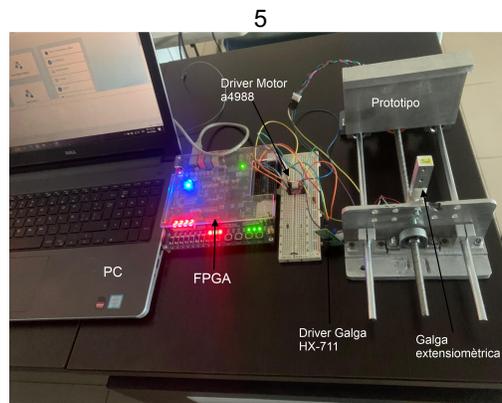


Figura 8. Elementos del prototipo, kit DE-1 y driver del motor a pasos y HX-711,
 Fuente: Elaboración propia.

La primera prueba que se hizo con el prototipo de PLA permitió verificar el funcionamiento de cada uno de los elementos como el movimiento del motor, la calibración del sensor, la adquisición y lectura de datos. La prueba consistió en adquirir 5000 muestras con la resolución más alta del motor, que es 1/16 de paso, el resultado obtenido de la prueba se muestra en la figura 9. Las mediciones con el prototipo impreso con PLA se muestran en la figura 9 (a), Se observa que se presentan mediciones erróneas al presionar el sensor. Estos picos afectan las mediciones ya que se presentan en el momento en que la pieza central del prototipo va presionando el sensor, lo que a su vez ocasiona una deformación en la pieza base del sensor de material PLA. Por lo tanto, el diseño de PLA produjo errores en las mediciones ya que no tiene suficiente rigidez para que el sensor no de estas mediciones. Por otro lado, la figura 9 (b) muestra una medición uniforme la cual se realizó con el prototipo de aluminio.

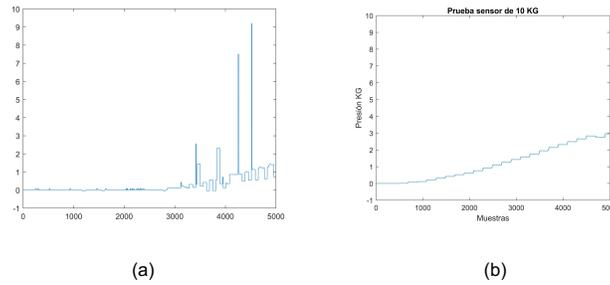


Figura 9. Medición de presión con el prototipo, (a) prototipo impreso en PLA, (b) prototipo de aluminio.
Fuente: Elaboración propia.

Debido a los errores de medición con el prototipo de PLA, se utilizó el prototipo de aluminio para poder obtener el peso mínimo correspondiente al desplazamiento que hace el motor con cada resolución. Estos resultados se muestran en la Tabla 2, donde se registran los pesos para un sensor de 10 Kg, 5Kg y 1 Kg.

Tabla 1. Distancia mínima por pulso para cada resolución de trabajo del prototipo.

Resolución de Trabajo del Motor	Distancia por pulso de trabajo (μm)	Sensor de 10 Kg (gramos)	Sensor de 5 Kg (gramos)	Sensor de 1 Kg (gramos)
Paso Completo	56.3380281690140	91.6	92.1	194.6
Medio Paso	28.1690140845070	53.9	75	95.5
¼ de Paso	14.0845070422539	22.3	20.9	40.6
1/8 de Paso	7.0422535211267	9.9	13.2	29.7
1/16 de Paso	3.5211267605633	5.28	6.59	6.59

Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta las tablas anteriores se demuestra que el prototipo cuenta con buena resolución referido a la presión mínima que puede llegar a ejercer, así como al desplazamiento mínimo que se puede tener con un pulso de trabajo en cada resolución. Finalmente, se realizó una prueba para conocer el valor máximo de presión que se puede llegar a ejercer con el prototipo. La prueba consistió en la adquisición 10,000 muestras, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz y un retardo para cada valor de pulsos de 100 muestras. Al querer llevar al máximo la presión se configuro que cada 100 muestras fuesen 10 pulsos de trabajo a una resolución de trabajo de 1/4 de paso. La figura 10 muestra las mediciones de esta prueba, de donde se puede observar que la presión máxima de trabajo del prototipo es de aproximadamente 3.02 Kg.

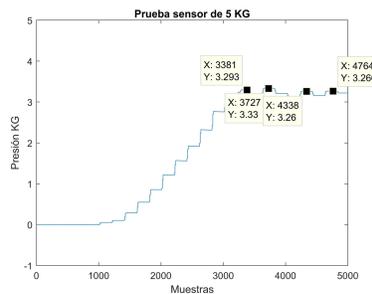


Figura 10. Grafica de prueba para obtener presión máxima con el prototipo, sensor de 5 Kg,
Fuente: Elaboración propia.



Conclusiones

En este trabajo se propone un prototipo basado en un FPGA para realizar la calibración y/o caracterización de sensores de fuerza de forma automática, el cual puede ser reconfigurado para utilizar galgas extensométricas de 1k, 5kg y 10kg. La automatización y control del prototipo se hizo mediante una interfaz gráfica de usuario que interactúa con la etapa de hardware logrando obtener un desplazamiento de 3.52 μm correspondiente a una presión de 5.28 gramos y como presión máxima se logró obtener 3.02 kg. Además, el prototipo es capaz de adquirir la señal mientras está en operación, para posteriormente ser enviada hacia la interfaz de usuario. Debido a la funcionalidad y versatilidad del prototipo, como trabajo futuro se utilizará para la caracterización y diseño de sensores de presión con fibras ópticas.

Referencias

- A Díez, J., Blanco, A., Catalán, J. M., J Badesa, F., Lledó, L. D., & García-Aracil, N. (2018). Hand exoskeleton for rehabilitation therapies with integrated optical force sensor. *Advanced in Mechanical Engineering*. A-Electronic's. (06 de 2022). *aelectronic's*. Obtenido de aelectronic's: <https://aelectronics.com.mx/modulos/1815-transmisor-de-celda-de-carga-hx711.html>
- Alzate Rodríguez, E. J., Montes Ocampo, J. W., & Silva Ortega, C. A. (2007). Medidores de deformación por resistencia: galgas extensométricas. *Scientia et Technica Año XIII*, 7-12.
- Bellini, B. (2009). Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la porturografía. *Núcleo de Ingeniería Biomédica facultades de medicina e ingeniería*. Obtenido de <http://www.nib.fmed.edu.uy/Seminario%202009/Monografias%20seminario%202009/Bellini-Celdas%20de%20carga%20para%20plataforma.pdf>
- Castillo, J., Rojas, V., & Martínez, J. (2017). Determinación del Torque y Potencia de un motor de combustión Interna a Gasoliuna Mediante el Uso de Bujía con sensor de Presión Adaptado y Aplicación de un Modelo Matemático. *Revista Politecnica*, 49 - 57. Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292017000100049&lng=es&nrm=iso
- Flores Cautle, J. A., Sandoval Gonzalez, O. O., & Trujillo Romero, C. J. (2020). Sensores de fuerza en sistemas de rehabilitación física. *Coloquio de investigación multidisciplinaria*. Obtenido de <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/467>
- Geancarlo, B. V. (2017). *Diseño de un sistema para medir la fuerza de corte en el acero SAE 1020 utilizando galgas extensométricas*. Universidad Nacional de Trujillo Facultad de Ingeniería, Trujillo, Peru. Obtenido de <https://dspace.unitrु.edu.pe/server/api/core/bitstreams/3caf54bb-2bd5-4f7f-8cb6-97bc3a329eac/content>
- Intel. (2022). *Información Técnica de la familia de dispositivos Cyclone II*. Obtenido de <https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/programmable/support-resources/devices/dev-cyclone2.html>
- Medina, F., Gutiérrez, J., & Mosquera, V. H. (2009). Control de fuerza por impedancia y estudio de un sensor de fuerza para una prótesis de mano de nueve grados de libertad. *Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca*.
- Mv electrónica*. (02 de 10 de 2023). Obtenido de Mv electrónica: <https://mvelectronica.com/producto/galga-extensometrica-de-1kg-celda-de-carga-modulo-hx711>
- Oliveira, R., & Fujiwara, E. (2023). Agar-based soft tactile transducer with embedded optical fiber specklegram sensor. *Results in Optics*, 10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100345>
- Ortuño Lizano, D. (2018). *Diseño de un sensor de fuerza/torque para la base móvil de un robot humanoide*. Universidad de Costa Rica, Facultad de ingeniería, Costa Rica. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10669/78395>
- Pololu. (2015). *Pololu Robotic & Electronics*. Obtenido de <https://www.pololu.com/search?query=a4988&x=0&y=0>
- Pololu. (2015). *Pololu Robotics & Electronics*. Obtenido de Pololu Robotics & Electronics: <https://www.pololu.com/product/2267>
- Ramón, P. A. (2008). *Sensores y Acondicionadores de Señal*. Alfaomega - Marcombo.
- unit electronics. (2020). *unit electronics*. Obtenido de <https://uelectronics.com>

