



Instrumentación de Equipo de Soldadura por Resistencia

Domínguez Molina Luis Alonso, Rivas Araiza Edgar Alejandro, Jáuregui Correa Juan Carlos, González Córdoba José Luis, Pedraza Ortega Jesús Carlos, Takacs Andras (✉)

Universidad Autónoma de Querétaro, México

✉ andras.takacs@uaq.edu.mx

Resumen

El artículo describe la instrumentación propuesta de un banco de pruebas para análisis de parámetros del proceso de soldadura por resistencia con soldadora manual Chicago Electric 61205, utilizando la plataforma Arduino UNO como controlador del sistema, entre los parámetros que influyen en la calidad del proceso de soldadura por resistencia se incluyen la corriente y la fuerza aplicada por los electrodos, por lo tanto se propone el uso de un transformador de corriente y una celda de carga para registrar los parámetros de corriente y fuerza generadas. El banco de pruebas incluye un pistón neumático de doble efecto, que acciona el mecanismo de cierre de los electrodos, el cual regula la fuerza aplicada al sistema. Los resultados incluyen el diseño de experimentos para calibración y validación de los parámetros de entrada. Este proyecto presenta un sistema capaz de controlar y registrar los principales parámetros del proceso de soldadura por resistencia con un alto nivel de precisión y repetibilidad. Teniendo una discrepancia máxima de 92 gramos con respecto a la media en la medición de fuerza, con una desviación estándar máxima de 7.022. Esto se traduce en un error mínimo con respecto al rango aplicable de este banco de pruebas, que se sitúa entre los 5,000 y los 12,000 gramos. Además, la medición de la corriente presenta una diferencia máxima de 0.18 amperios con respecto a la media, mientras que la desviación estándar máxima es de 0.226.

Palabras clave: Soldadura por resistencia, Corriente de soldadura, Fuerza de los electrodos, Tiempo de soldadura.

Abstract

The article describes the proposed instrumentation of a platform for experimentation for analysis of parameters of the resistance welding process with manual welder Chicago Electric 61205, using the Arduino UNO platform as the system controller, including the parameters that influence the quality of the resistance welding process are the current and force applied by the electrodes, therefore it is proposed the use of a current transformer and a load cell to record the parameters of applied current and force. The platform for experimentation includes a double-acting pneumatic cylinder, which drives the closing mechanism of the electrodes and regulating the force applied to the system. The results include the design of experiments for calibration and validation of the input parameters. This project presents a system capable of controlling and recording the main parameters of the resistance spot welding process with a high level of accuracy and repeatability. Having a maximum discrepancy of 92 grams to the mean in the force measurement, with a maximum standard deviation of 7.022. This translates into a minimum error with respect to the applicable range of this test stand, which is between 5,000 and 12,000 grams. In addition, the current measurement has a maximum difference of 0.18 amperes from the mean, while the maximum standard deviation is 0.226.

Keywords: Resistance spot welding, Weld Current, Electrode Force, Weld time.



1. Introducción

La soldadura por puntos de resistencia (RSW, por sus siglas en inglés) es un proceso de manufactura el cual une dos componentes metálicos [1]. En este se aplica una presión a dos electrodos posicionados a cada lado de los materiales que se van a unir, y posteriormente se aplica una alta corriente eléctrica a través de los electrodos, creando resistencia en el punto en el que entran en contacto con los componentes metálicos y generando calor, lo que hace que el metal se funda y se fusione en ese punto [2].

Este proceso es ampliamente utilizado en la industria automotriz y aeroespacial, así como en diversas aplicaciones de manufactura, debido a sus bajos tiempos de ciclo, bajo costo de operación, facilidad de implementación y flexibilidad para adaptarse a diferentes combinaciones de materiales como acero, aluminio, titanio, entre otros [1]. Además, el proceso RSW es conocido por su alta precisión y repetibilidad, lo que garantiza una calidad constante en la producción en serie, permitiendo obtener una unión resistente y duradera entre piezas metálicas.

En el proceso de soldadura por puntos, la calidad de la soldadura depende en gran medida de la precisión y control de los parámetros clave como la corriente, la presión y el tiempo de soldado [3]. Debido a que la mayoría de estos parámetros varían durante la formación del punto de fusión, es esencial tener un sistema que monitoree continuamente su evolución en tiempo real [4]. Este monitoreo garantiza soldaduras fuertes y duraderas, ya que cualquier variación en los parámetros puede afectar significativamente la calidad de la soldadura.

Por lo que realizar mediciones precisas y confiables para obtener datos exactos y representativos es fundamental en cualquier estudio del proceso de soldadura. Además, de poseer la capacidad de medir sistemáticamente estos parámetros permite identificar cualquier desviación o fallo en el proceso de soldadura, garantizando la calidad en el proceso.

El siguiente estudio de investigación se centra en el desarrollo y la validación de un banco de pruebas que utiliza un transformador de corriente a diferencia de estudios reportados en la literatura donde se utiliza una bobina de Rogowski. Este banco también permite el seguimiento continuo de la fuerza aplicada al sistema durante la formación del punto de soldadura por medio de una celda de carga, el cual permite tener un análisis más exhaustivo del proceso de soldadura y sus efectos. Además de esto, el estudio también pretende proporcionar variabilidad en las mediciones y una caracterización de la fuerza implicada en el proceso de soldadura por resistencia. Dicho prototipo permitirá determinar la variabilidad de los parámetros de entrada tanto de corriente por medio de un transformador de corriente, el cual no se encontró su uso en este tipo de aplicaciones dentro del estado del arte y la fuerza en los electrodos durante el proceso de soldadura que regularmente solo se caracteriza como un parámetro de entrada y no un monitoreo en tiempo real.

1.1 Estado del arte

Varios autores han estudiado ampliamente las señales eléctricas en el proceso de soldadura por resistencia debido a que la mayoría de los componentes de estas señales varían con la formación del punto de fusión a lo largo del proceso de soldadura, pueden utilizarse para supervisar y evaluar la calidad de la soldadura.

En el trabajo [5], se presentó un dispositivo de monitoreo de parámetros eléctricos para registrar el voltaje, la corriente, la potencia y la resistencia durante la soldadura por puntos utilizando un sensor de efecto Hall. Los datos obtenidos mediante esta técnica se analizaron para comprender los fenómenos que se producen durante la formación del punto de fusión.



En un enfoque similar [6] utilizaron una red neuronal para predecir la resistencia al esfuerzo cortante utilizando parámetros como la corriente, la fuerza, el tiempo y la resistencia dinámica como entrada de la red para la predicción.

En [4] se desarrolló un prototipo para monitorear la calidad de las uniones soldadas utilizando parámetros como la corriente, el voltaje, la fuerza del electrodo y un sensor acústico para predecir el diámetro de la soldadura, la resistencia mecánica y la aparición del fenómeno de salpicaduras del metal.

En el trabajo [3], se investigó la viabilidad de la soldadura de dos materiales: “Quenching and Partitioning” (Q&P) y “Transformation Induced Plasticity” (TRIP). Se evaluaron los efectos de parámetros de entrada como la corriente, el voltaje, la resistencia eléctrica y la presión del electrodo en relación con propiedades mecánicas como la resistencia mecánica. Se encontró que los parámetros clave que influyen en la calidad de la soldadura fueron la corriente de soldadura, la fuerza del electrodo y el tiempo de soldadura.

En [7] realizaron un estudio para evaluar la influencia de la polaridad en una máquina de soldadura por resistencia adaptándola para registrar los parámetros de tensión y corriente utilizando una bobina Rogowski, así como el registro de la temperatura mediante una cámara termográfica. Se realizaron comparaciones entre las dos polaridades en cuanto al aspecto de la superficie, el diámetro de fusión y una prueba jalón para registrar los modos de fallo interfacial (en inglés, interfacial failure) que ocurre cuando se tiene una rotura en la zona de la soldadura, o modo de fallo por extracción (en inglés, pull-out failure) donde la rotura ocurre en el material base adyacente a la zona de fusión.

En [8], se utilizó un modelo de bosques aleatorios (en inglés, Random Forest) para clasificar la calidad de la soldadura en tres categorías (soldaduras frías, expulsión y soldaduras buenas) mediante la captura de parámetros eléctricos como el voltaje, la corriente y el cálculo de la resistencia dinámica.

De forma similar, en el trabajo de [9], se propuso un sistema de detección en tiempo real, donde la corriente y el voltaje. Las señales de corriente se analizaron para caracterizar la calidad de la soldadura, que se clasificó en tres categorías: soldaduras malas, soldaduras buenas y soldaduras de salpicaduras del metal. Estas señales se utilizaron como entradas para una red neuronal artificial y un modelo de regresión, y se analizó su precisión de predicción.

Por último, [10] monitorea los parámetros de corriente y voltaje para determinar la resistencia mecánica, adicionalmente explora la relación entre la presión de los electrodos y su influencia en la resistencia dinámica de la pieza. Determina que el pico inicial de la resistencia dinámica se ve afectado por la presión de los electrodos. Finalmente utiliza dos modelos de regresión y una red neuronal para predecir el diámetro de fusión a partir de la resistencia dinámica, esta pasa por un proceso de análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés) para reducir su dimensionalidad y reducir el costo computacional.

Las propuestas revisadas utilizan una bobina Rogowski, la cual es una opción popular para medir corrientes en aplicaciones de alta potencia. Sin embargo, estas bobinas son susceptibles a campos magnéticos externos, lo que afecta la precisión de la medición, en comparación, los transformadores de corriente como el que se propone en el presente trabajo son resistentes a interferencias magnéticas externas [11], lo que los hace una opción más confiable en entornos con alta actividad electromagnética. Además, las bobinas de Rogowski pueden presentar problemas en aplicaciones de alta frecuencia, lo que limita su versatilidad y precisión en este tipo de escenarios. Adicionalmente, requieren de un circuito integrador para convertir la señal, lo que aumenta la complejidad del sistema.

En cuanto al registro de la fuerza de los electrodos, en los trabajos presentados solo se registra el parámetro de fuerza que se asigna como entrada. Aunque esto puede ser útil para monitorear y controlar la fuerza aplicada en la operación, no se registran las mediciones de fuerza de los electrodos durante dicha operación en tiempo real. Además, el registro de la fuerza en diferentes puntos durante

la operación podría proporcionar información valiosa sobre la distribución de la fuerza en la muestra y ayudar a mejorar la calidad de los resultados.

2. Instrumentación

Uno de los factores clave que influyen en la calidad del proceso de soldadura por resistencia consistente en la formación del punto de soldadura. En ello influyen directamente tres parámetros esenciales: fuerza de los electrodos, corriente de soldadura y tiempo de soldadura. Estos se consideran los parámetros principales de la soldadura por puntos por resistencia, y cada uno de ellos desempeña un papel importante en la formación de una soldadura de calidad [12].

Fuerza de los electrodos (en inglés, Electrode Force): La fuerza del electrodo se utiliza para presionar los componentes durante la soldadura. Debe ser lo suficientemente fuerte para superar la distorsión del material y así tener un contacto óptimo antes de que fluya la corriente, pero no demasiado para evitar problemas.

Corriente de soldadura (en inglés, Weld Current): La cantidad de corriente eléctrica utilizada durante la soldadura. Se aconseja mantener la corriente de soldadura lo más baja posible de acuerdo con cada aplicación. Si la corriente de soldadura es demasiado alta, se producirán salpicaduras y los electrodos pueden quedar pegados al material. La corriente en el proceso de soldadura por resistencia se encuentra en el rango de los miles de amperes [13], esta varía dependiendo de diferentes factores como el tipo de material, espesor de los componentes, tiempo de ciclo aplicado, entre otros. Un método para determinar un rango de aceptables es por medio de las curvas Lobe [5]. La figura 1 presenta un ejemplo de las curvas Lobe.

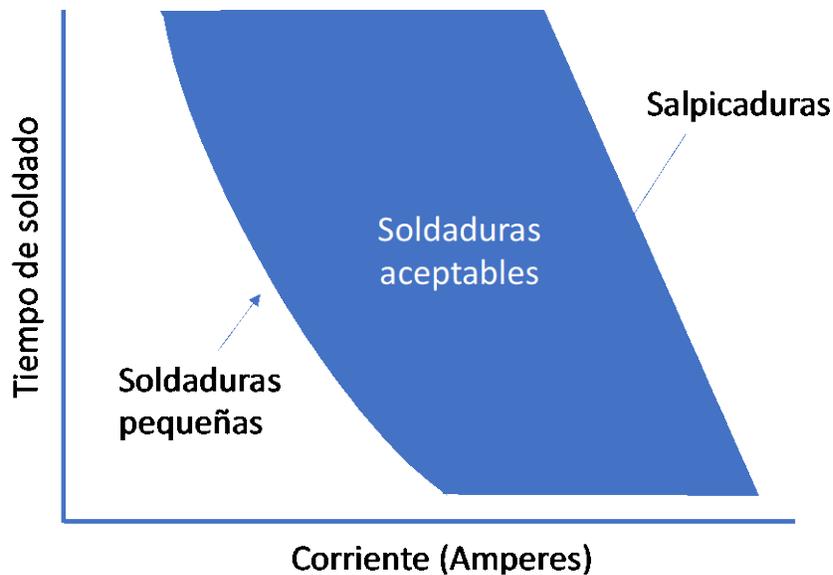


Figura 1. Curva Lobe de soldadura por resistencia, adaptada de [5].

Tiempo de soldadura (en inglés, Weld Time): Es el tiempo en el que se aplica la corriente eléctrica por medio de los electrodos a los metales, generando el punto de fusión. Adicionalmente se tienen los tiempos de compresión que se utiliza para que la fuerza aplicada a las piezas se estabilice y

el tiempo de espera que es después del soldado y es necesario para que la soldadura se solidifique antes de soltar las piezas.

La Figura 2 muestra una representación visual de estos parámetros y su comportamiento durante el proceso.

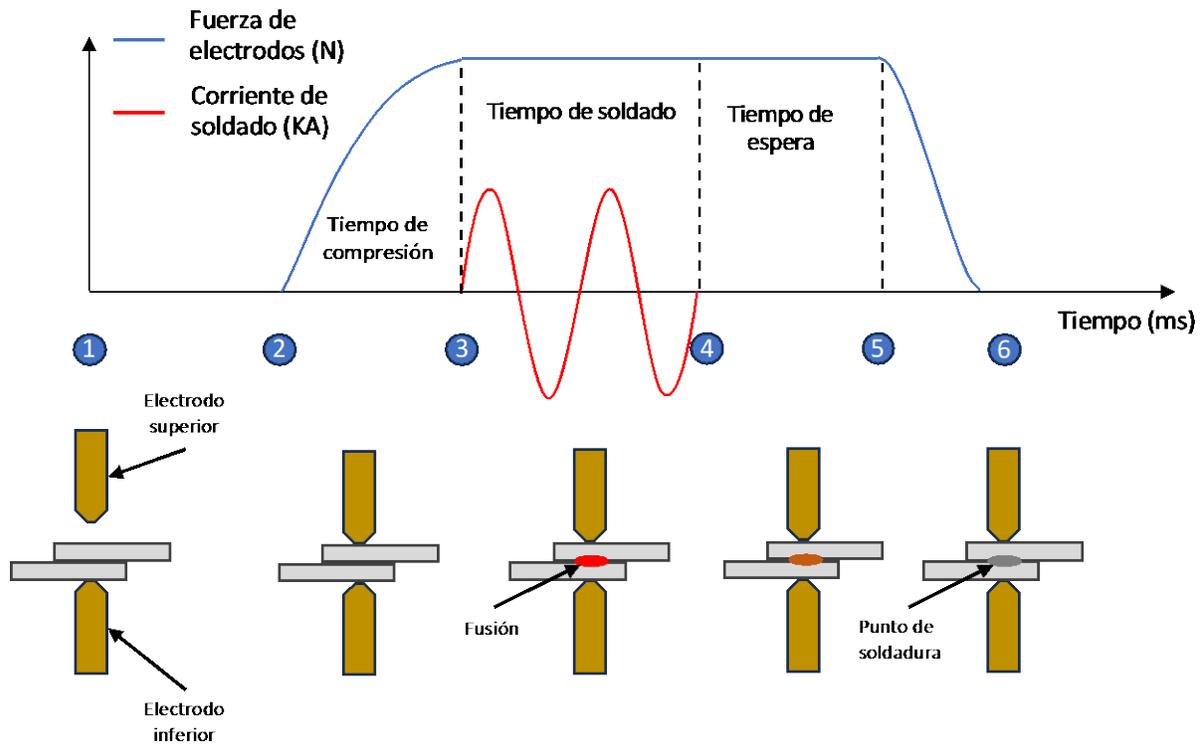


Figura 2. Secuencia del proceso de soldadura por puntos, adaptada de [14].

La instrumentación de la máquina de soldadura por resistencia utiliza un Arduino UNO como placa de control para el registro de los parámetros de fuerza y corriente, así como para determinar el tiempo de ciclo del proceso. El diagrama de flujo del programa se muestra en la figura 3.

2.1 Registro de Fuerza de los electrodos

Para registrar la fuerza aplicada a los electrodos, se utilizó una celda de carga PSD-S1 de 300kg con las especificaciones que se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de celda de carga PSD-S1.

| Característica | Valor |
|-------------------------|----------------------|
| Carga máxima | 300 kg |
| Voltaje de alimentación | 5V |
| Sensitividad | 2 milivolts por volt |

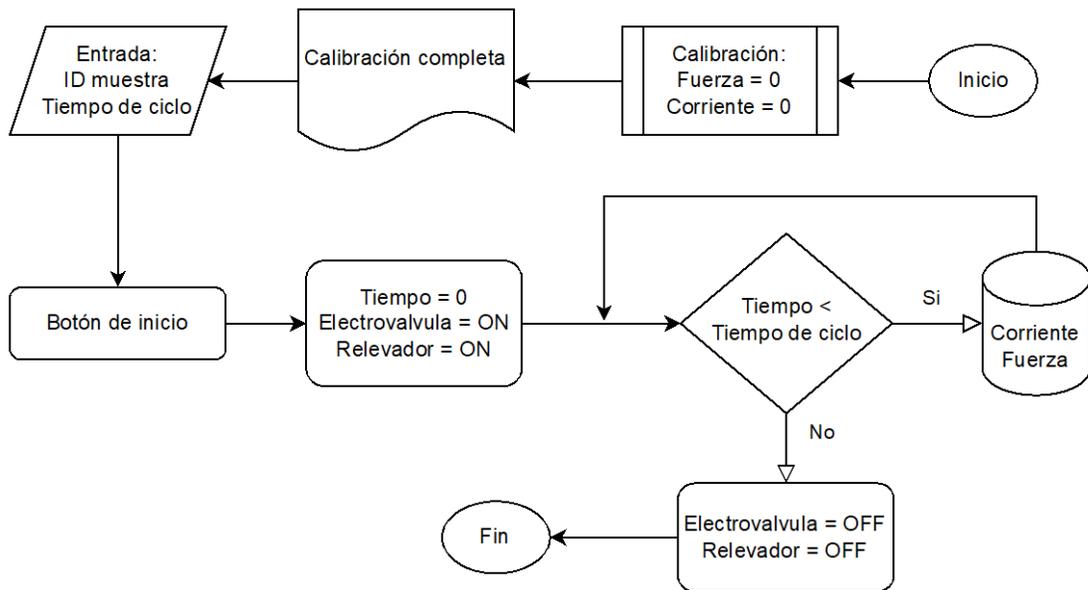


Figura 3. Diagrama de flujo del programa

Adicionalmente se incluye un convertidor analógico-digital para básculas HX711 de 24 bits, el cual permite obtener una sensibilidad en la medición de 0.0178g. Este circuito integrado utiliza un protocolo de comunicación serial, el cual transmite la información por dos salidas digitales: una para datos (DOUT) y otra para el reloj (SCK). Cuando DOUT se encuentra en un estado bajo, indica que un nuevo dato está listo, después manda los 24 bits y DOUT vuelve a un estado alto. Este circuito cuenta con una librería en la plataforma de Arduino "HX711_ADC.h", la cual cuenta con una función de calibración que se realiza utilizando un peso conocido para poder ajustar cualquier desviación, este dato es posteriormente guardado en la memoria EEPROM. Esta tarjeta electrónica comercial proporcionaría una sensibilidad mayor, ya que cuenta con un ADC de mayor resolución (24 bits) en comparación con el ADC de 10 bits del Arduino. Además, esta tarjeta viene acompañada de documentación técnica detallada con bibliotecas y funciones específicas para las celdas de carga, lo que facilita su integración. Esta mayor sensibilidad y el soporte hacen de la HX711 una opción superior para proyectos que requieren mediciones precisas. El circuito electrónico se presenta en la figura 4.

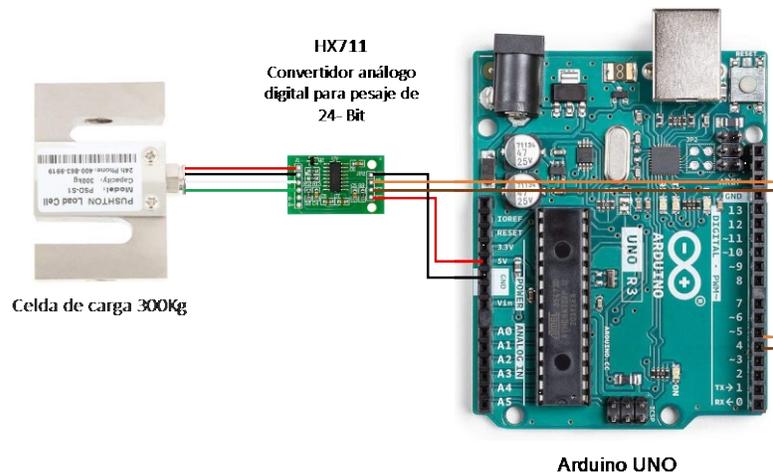


Figura 4. Circuito electrónico para registro de fuerza

2.2 Registro de Corriente de soldadura

Para la medición de la corriente que pasa a través de los electrodos se utilizó un transformador de corriente de TS-816 6000/5A, el cual genera una corriente de 5 amperes por cada 6000 amperes que pasan por la corriente principal, con las especificaciones que se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Especificaciones de transformador de corriente TS-816.

| Característica | Valor |
|----------------------------|---------------|
| Corriente primaria medida | 6000 A máximo |
| Corriente secundaria | 0 – 5 A |
| Relación de transformación | 6000/5 A |
| Frecuencia | 50-60Hz |

Para medir la señal del transformador de corriente se utilizó un medidor de corriente ACS712 para convertir la señal de corriente a voltaje, y así poder registrar la corriente aplicada que fluye a través de las placas metálicas a la placa del Arduino por medio de una entrada analógica, este tiene una sensibilidad de 100 mV por ampere. También cuenta con una librería en Arduino “ACS712.h”, la cual cuenta con las funciones de calibración la cual pone en cero al sensor y medición de corriente AC, donde se utiliza la técnica de raíz cuadrada media (RMS, por sus siglas en inglés) para la medición. Esta tarjeta brinda una medición confiable [15], ya que sus componentes han sido sometidos a rigurosas pruebas y han sido certificados, lo que garantiza su calidad y eficacia. Además, la completa documentación técnica que acompaña a esta tarjeta incluye curvas características detalladas [16]. El circuito electrónico se presenta en la figura 5.

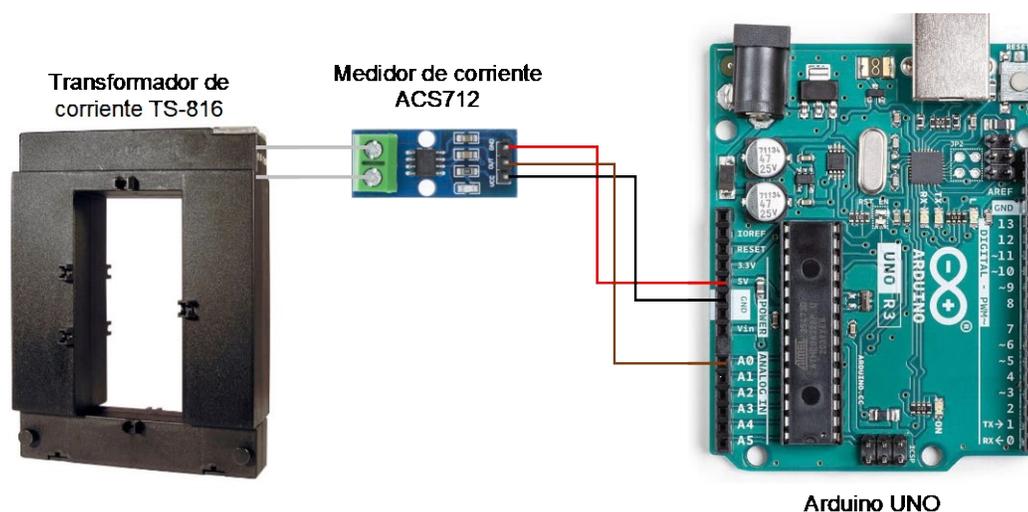


Figura 5. Circuito electrónico para registro de corriente.

2.3 Control de fuerza

Para la aplicación de la fuerza se utilizó un cilindro neumático de doble efecto. La activación del cilindro se consigue mediante el uso de una electroválvula direccional de 5/2 vías, activada por una

salida digital del Arduino Uno. La fuerza aplicada al sistema es regulada mediante el ajuste de una presión específica por medio de un regulador de presión. Este enfoque proporciona un medio de control preciso del proceso de aplicación de fuerza.

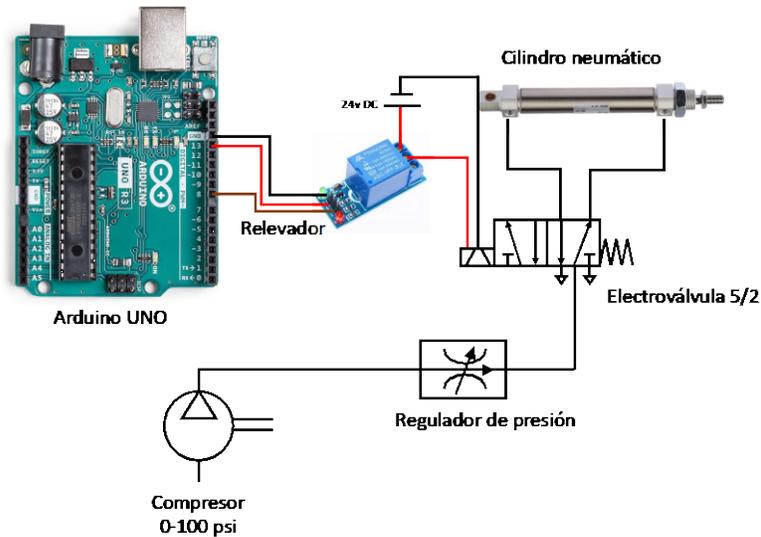


Figura 6. Circuito electrónico y neumático para control de fuerza

2.4 Tiempo de soldado

Los parámetros de tiempo de soldado, tiempo de compresión y tiempo de espera, se establecen dentro del programa en el Arduino uno. El banco de pruebas físico se muestra en la figura 7.

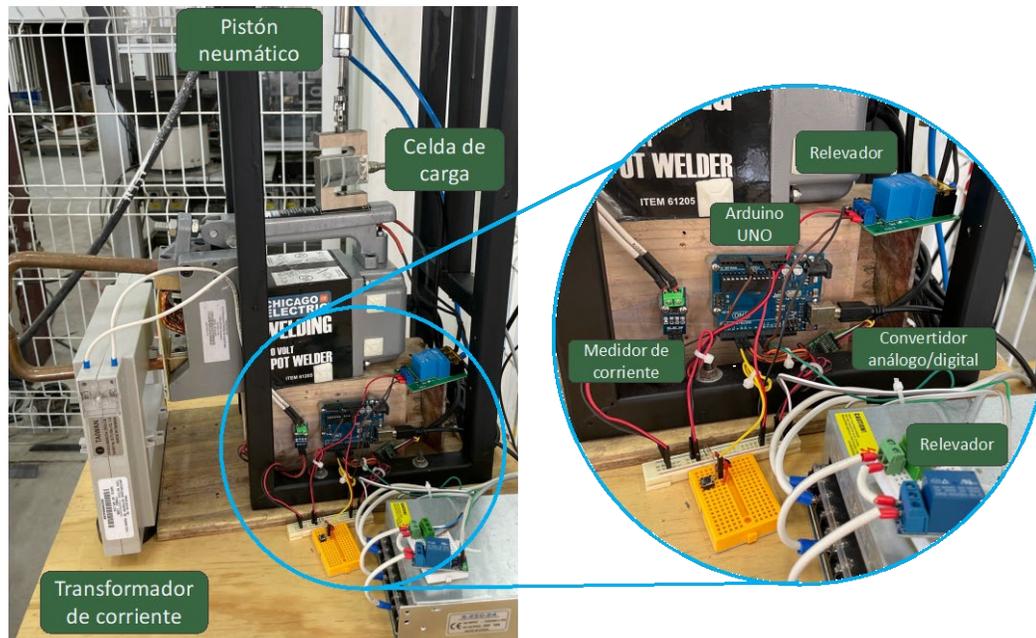


Figura 7. Banco de prueba



3. Resultados

Es necesario garantizar la precisión y fiabilidad en la medición, por lo cual se realizó una calibración de los parámetros de fuerza aplicada a los electrodos y corriente, así como también múltiples pruebas con diferentes rangos para determinar repetibilidad de la medición.

Para la celda de carga se utilizaron múltiples masas constantes de 266 g, previamente pesadas con una báscula calibrada, cambiando el número de masas para incrementar el peso en un rango de 0 g a 2128 g, tomando 31 puntos de medición por cada paso. Los resultados fueron consistentes, demostrando la precisión de la celda de carga para una amplia gama de mediciones de peso. Con este nivel de confianza, se puede fiar del banco de pruebas para la medición de la fuerza aplicada.

Tabla 3. Resultados de fuerza real contra mediciones.

| | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Dato Real | 0 g | 266 g | 510 g | 765 g | 1020 g | 1275 g | 1530 g | 1785 g | 2040 g |
| Media de medición | 0.18 g | 264.42 g | 529.26 g | 797.45 g | 1064.5 g | 1332.9 g | 1599.8 g | 1866.2 g | 2132.5 g |
| Desviación estándar | 0.271 | 7.022 | 3.618 | 0.331 | 0.245 | 0.232 | 0.950 | 0.667 | 0.330 |

Para la medición de corriente se aplicaron múltiples tensiones con el uso de un regulador de voltaje de corriente alterna y una resistencia con disipador constante para generar diferentes rangos de corriente verificados con el uso de un multímetro Fluke 177, el cual tiene una resolución de 0.01 mA y puede medir una corriente máxima de 10 A. Se hicieron pruebas dentro de un rango de corriente de 0 A a 5 A, con incrementos de 0,5 A, tomando un total de 35 puntos de datos en cada paso, donde se encontró que los resultados fueron consistentes y repetibles, demostrando la precisión del circuito.

Tabla 4. Resultados de corriente real contra mediciones.

| | | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dato Real | 0 A | 0.5 A | 1 A | 1.5 A | 2 A | 2.5 A | 3 A | 3.5 A | 4 A | 4.5 A | 5 A |
| Media de medición | 0 A | 0.50 A | 0.99 A | 1.47 A | 1.93 A | 2.46 A | 2.86 A | 3.31 A | 3.82 A | 4.44 A | 4.84 A |
| Desviación estándar | 0 | 0.025 | 0.042 | 0.069 | 0.093 | 0.111 | 0.15 | 0.153 | 0.179 | 0.205 | 0.226 |

Por último, se midió la fuerza de aplicada a los ajustando la presión de alimentación en diferentes rangos, para determinar la relación entre el suministro de presión y la fuerza medida. El proceso consistió en activar manualmente la electroválvula y registrar 121 puntos de datos por muestra. El rango de presiones aplicadas se realizó desde una presión mínima de 35 psi (necesaria para la activación de la válvula) hasta la máxima de 95 psi (presión máxima del cilindro neumático). Y para garantizar la repetibilidad, se registraron 30 muestras en cada paso. Los resultados de este experimento determino la variación de las mediciones a distintos niveles de presión.

En las figuras 8 a 12 se presentan los registros de fuerza en el rango de 35PSI – 95PSI, con incrementos de 15PSI entre pruebas. Cada gráfica contiene 30 muestras de una activación manual. Se

observa que el punto máximo tiene poca variabilidad entre las 30 muestras, indicando que el proceso es constane y repetible.

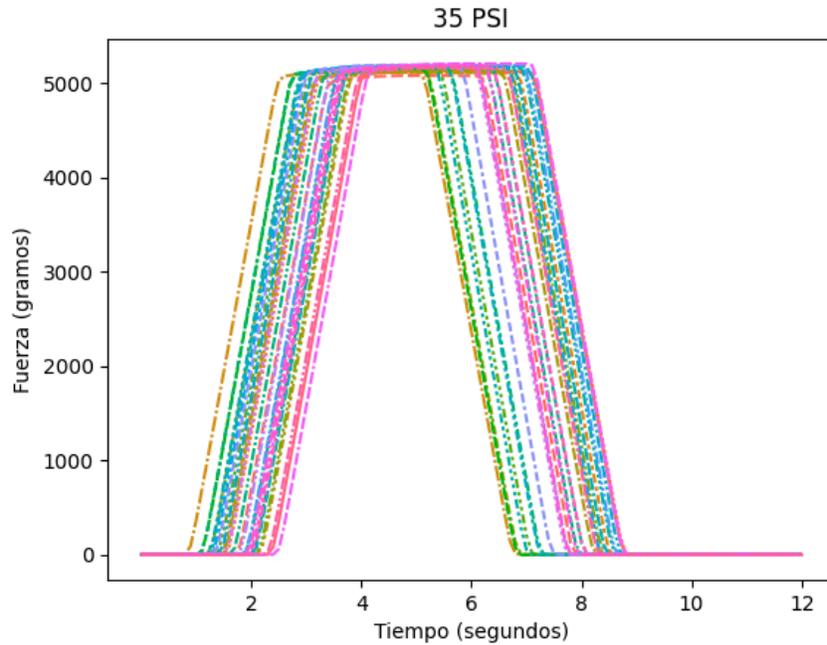


Figura 8. Registro fuerza de 30 muestras con activación manual a 35PSI

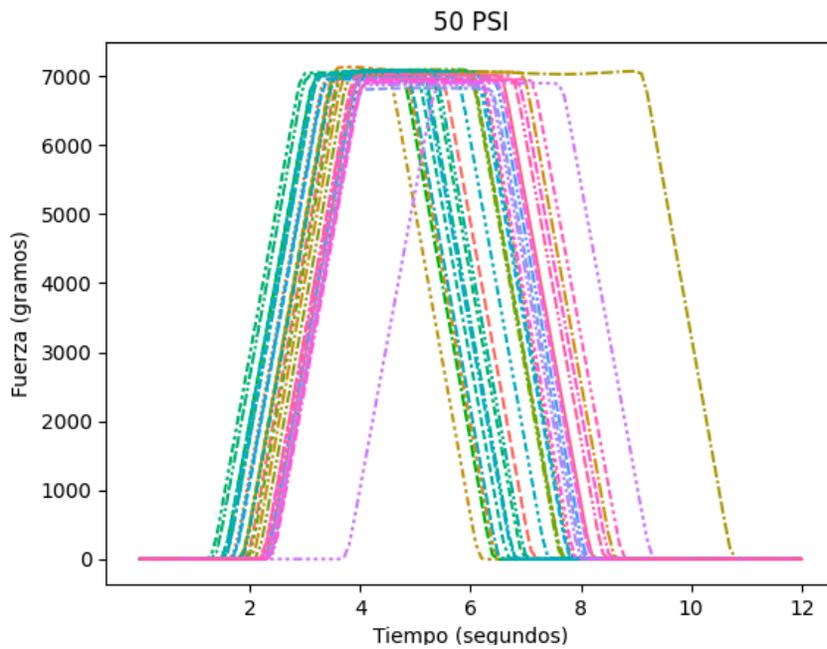


Figura 9. Registro fuerza de 30 muestras con activación manual a 50PSI

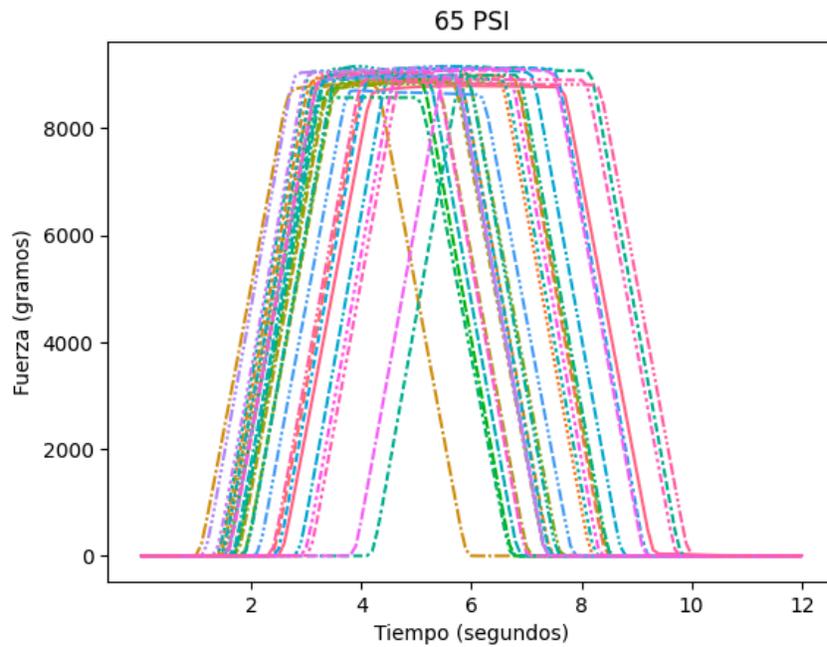


Figura 10. Registro fuerza de 30 muestras con activación manual a 65PSI

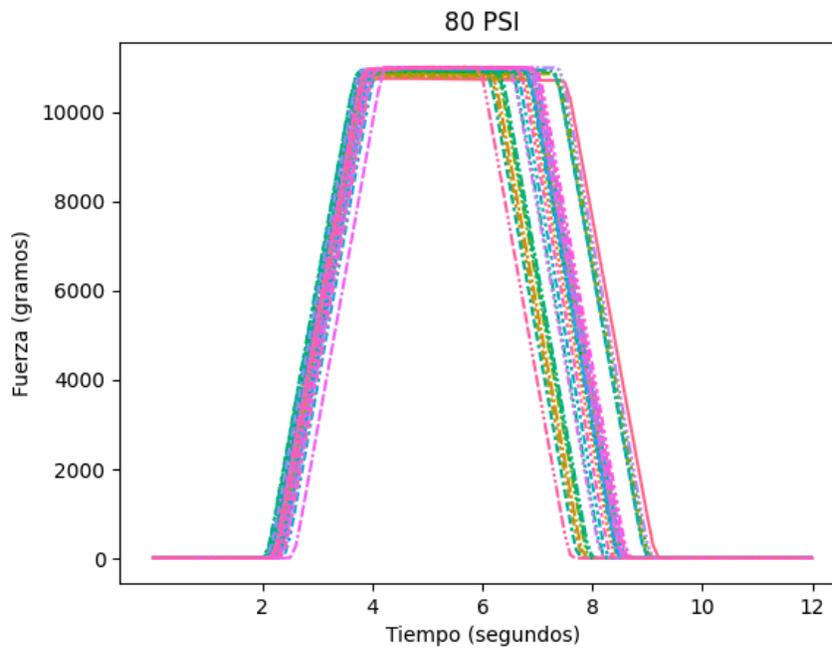


Figura 11. Registro fuerza de 30 muestras con activación manual a 80PSI

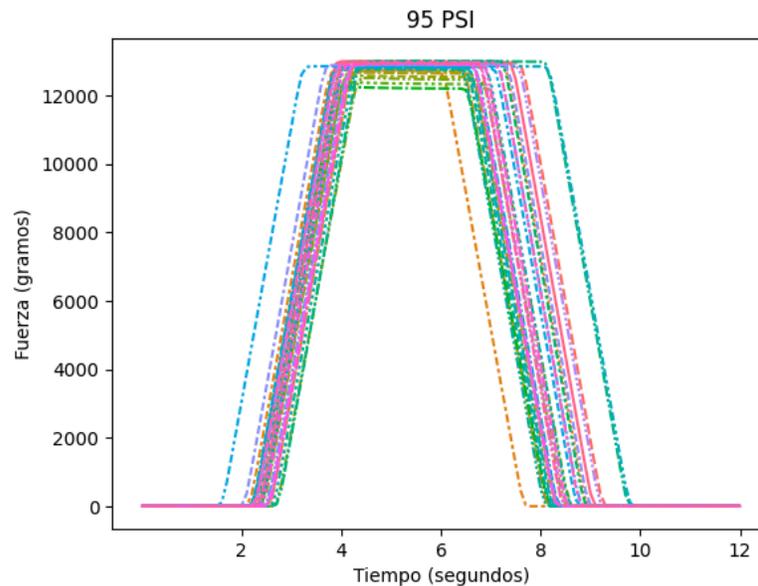


Figura 12. Registro fuerza de 30 muestras con activación manual a 95PSI

A diferencia de los trabajos anteriores que proponen el uso de una bobina Rogowski como sensor de corriente, este trabajo propone la integración de un transformador de corriente, así como también propone el registro en tiempo real de la fuerza aplicada al sistema. Adicionalmente, la variabilidad de las mediciones y la caracterización precisa de la fuerza en el proceso de soldadura por resistencia también están incluidas en esta investigación.

4. Conclusiones

En conclusión, este proyecto presenta un sistema capaz de controlar y registrar los parámetros principales del proceso de soldadura por resistencia con un alto nivel de precisión y repetibilidad. En relación a la medición de la fuerza, se observa una discrepancia máxima de 92 gramos en comparación con la media y una desviación estándar máxima de 7.022, lo que se traduce en un error mínimo, comparado con el rango de aplicación del presente banco de pruebas, el cual se encuentra en el rango de 5,000 a los 12,000 gramos. Por otro lado, la medida de corriente presenta una diferencia máxima de 0.18 amperes con respecto a la media, mientras que la desviación estándar máxima es de 0.226.

En conclusión, es fundamental realizar mediciones precisas y confiables para obtener datos precisos y representativos en cualquier estudio científico. Además, de tener la capacidad para medir sistemáticamente estos parámetros, permitirá identificar y cualquier desviación o fallo en el proceso de soldadura, garantizando un resultado uniforme y de alta calidad, ya que la monitorización precisa de estos parámetros es crucial para garantizar la integridad y resistencia de la unión soldada.

En cuanto a futuras investigaciones, un área importante a explorar es la determinación de la relación entre los diferentes parámetros de entrada en un proceso de soldadura y su impacto en la calidad del resultado final. Esta relación puede ser representada por medio de variables de salida como el diámetro de fusión, la resistencia mecánica de la soldadura o posibles defectos en la superficie como la expulsión de material en el punto de fusión. Al entender cómo estos factores están relacionados, se podrían identificar las mejores prácticas en cuanto a la configuración de los parámetros para lograr soldaduras consistentes y sin defectos. Además, al contar con esta información, se podrían desarrollar herramientas tecnológicas que optimicen el proceso de soldadura.



5. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero proporcionado por CONACYT a través de la beca para Luis Alonso Domínguez Molina, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo financiero del proyecto FONDEC (20205007071001).

Referencias

- [1] Summerville, C., Compston, P., y Doolan, M. A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques. *Procedia Manufacturing*, 29, 305-312, 2019.
- [2] Xiao, M., Yang, B., Wang, S., Zhang, Z., Tang, X., y Kang, L. A feature fusion enhanced multiscale CNN with attention mechanism for spot-welding surface appearance recognition. *Computers in Industry*, 135, 103583, 2022.
- [3] Russo, P., De Maddis, M., D'Antonio, G., y Lombardi, F. Weldability and monitoring of resistance spot welding of Q&P and TRIP steels. *Metals*, 6(11), 270, 2016.
- [4] Catty, J. Development of an equipment to monitoring and control the quality of resistance welding. *Journal of Acoustic Emission(USA)*, 18, 205, 2000.
- [5] Dickinson, D. W., Franklin, J. E., y Stanya, A. Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring. *Welding Journal*, 59(6), 170, 1980.
- [6] Arunchai, T., Sonthipermpon, K., Apichayakul, P., y Tamee, K. Resistance spot welding optimization based on artificial neural network. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014.
- [7] Espinel, A., Sánchez, A., Carvajal, H., Antonio, V., y Oliveira, L. Influence of polarity on mechanical properties of dissimilar resistance spot welds of DP 600/AISI 304 steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 21(8), 607-613, 2016.
- [8] Xing, B., Xiao, Y., Qin, Q., y Cui, H. Quality assessment of resistance spot welding process based on dynamic resistance signal and random forest based. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 327-339, 2018.
- [9] Zhao, D., Wang, Y., Liang, D., y Ivanov, M. Performances of regression model and artificial neural network in monitoring welding quality based on power signal. *Journal of materials research and technology*, 9(2), 1231-1240, 2020.
- [10] Zhao, D., Ivanov, M., Wang, Y., y Du, W. Welding quality evaluation of resistance spot welding based on a hybrid approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 1819-1832, 2021.
- [11] Bawankule, P., y Chandrasekaran, K. *Analysis of Rogowski Coil Shielding Effectiveness with External Vertical Magnetic Field Using FEM* (No. 11172). EasyChair, 2023.
- [12] Podržaj, P., Polajnar, I., Diaci, J., y Kariž, Z. Overview of resistance spot welding control. *Science and technology of welding and joining*, 13(3), 215-224, 2008.
- [13] Xiao, M., Yang, B., Wang, S., Zhang, Z., Tang, X., y Kang, L. A feature fusion enhanced multiscale CNN with attention mechanism for spot-welding surface appearance recognition. *Computers in Industry*, 135, 2022.
- [14] Asari R. Resistance spot welding – weldability lobe simulation development. *Sch J Appl Sci Res*, 2, 1-5, 2019.
- [15] Khwanrit, R., Kittipiyakul, S., Kudtonagngam, J., y Fujita, H. Accuracy comparison of present low-cost current sensors for building energy monitoring. In *2018 International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology & International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems (ICESIT-ICICTES)* (pp. 1-6). IEEE. 2018.
- [16] Allegro MicroSystems. ACS712, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. *Allegro MicroSystems*. 2018. [Online]. Disponible: <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>. [Consultado en: 22-Ene-2024].



Autores

Luis Alonso Domínguez Molina: Ingeniero en Mecatrónica, egresado de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Cuenta con 8 años de experiencia como ingeniero de manufactura y nuevos proyectos, encargado de desarrollo de nuevos productos y transferencias de líneas de producción. Actualmente estudiante de la Maestría en Ciencias en Inteligencia Artificial en la Universidad Autónoma de Querétaro. Contacto: luis_yo27@hotmail.com

Dr. Edgar Rivas: Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma de Querétaro desde 2010 adscrito a la facultad de ingeniería, es miembro del SNI nivel I, cuenta con perfil deseable PRODEP y forma parte del cuerpo académico consolidado "Sistemas Embebidos y Aplicaciones", sus actividades incluyen docencia a nivel licenciatura y posgrado, ha dirigido y colaborado en distintos proyectos de investigación con financiamiento externo. Su área de interés incluyen visión por computadora, sistemas embebidos, automatización, procesamiento de señales y control automático. Cuenta con publicaciones en congresos nacionales e internacionales, en revistas arbitradas e indizadas, colaborador en capítulos de libro, además ha dirigido trabajos de tesis a nivel licenciatura, maestría y doctorado. Miembro de la IEEE desde 2004.

Dr. Juan Carlos Jáuregui: Profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro desde 2012, en donde realiza investigaciones avanzadas en el diseño y dinámica de maquinaria. Por más de treinta años se ha dedicado al diseño de máquinas automatizadas que operan en distintas empresas nacionales e internacionales. También ha trabajado en el desarrollo de sistemas de monitoreo y análisis de vibraciones con los que se determinan las condiciones de operación de los equipos. Es Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (1983). Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica por la misma Facultad (1984), se graduó de Doctor en Ingeniería en la Universidad Wisconsin-Milwaukee (1986) y cursó el Diplomando en Alta Dirección AD2 del IPADE. Tiene la distinción Fellow de ASME, es miembro del Comité Ejecutivo de la IFToMM, es senior member de IEEE, miembro de las Académias de Ciencia y de Ingeniería de México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 1988 y desde 2003 tiene el nivel III.

Dr. José Luis González-Córdoba: Obtuvo la licenciatura en Ingeniería Electrónica y la maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, en 2010 y 2013, respectivamente. Posteriormente, obtuvo el grado de Doctor en Mecatrónica por la Universidad Autónoma de Querétaro, en San Juan del Río, México, en 2018. Actualmente, se desempeña como profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro y está reconocido como Investigador Nacional Nivel I por el Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT). Sus intereses de investigación abarcan Inteligencia Artificial, Gemelos Digitales, procesamiento digital de señales, control, calidad de energía y microrredes eléctricas inteligentes.

Dr. Jesús Carlos Pedraza Ortega: Realizó sus estudios de Maestría en la FIMEE, Universidad de Guanajuato. Obtuvo el Doctorado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica - Sistemas de Reconstrucción 3D en la University of Tsukuba en Japón, donde trabajó con el desarrollo de un sistema monocular de reconstrucción 3D. Como docente, ha impartido diferentes cursos en los tres niveles de estudios (Licenciatura, Maestría y Doctorado) desde 1997, actualmente en la Universidad Autónoma de Querétaro. Es Senior Member por la IEEE y es miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Sus líneas de investigación son sistemas de reconstrucción 3D, inteligencia artificial aplicada a sistemas de visión, entre otros.

Dr. Andras Takacs: Es Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma de Querétaro. Maestro en Ciencias Computacionales (University College London, Inglaterra). Actualmente es Profesor de Ciencias de la Computación en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, México. Sus intereses de investigación incluyen percepción visual robusta, reconocimiento de lugares en condiciones cambiantes, aprendizaje automático, SLAM y estimación probabilística.