



Artículo de revisión

Revisión de métodos no destructivos para la evaluación de la soldadura por puntos de resistencia en la industria automotriz

Review of non-destructive methods for the evaluation of resistance spot welding in the automotive industry

Jazmin Monserrat Rodriguez Torres¹ , Carolina Reta² , Francisco Javier Ibarra Villegas³ 

¹Posgrado CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Cto. Aguascalientes Nte. 135, Parque industrial de Valle de Aguascalientes, Aguascalientes, 20358, Aguascalientes, México.

²CONAHCYT–CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Gaza 30 Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín Tlaxiaca, 42163, Hidalgo, México.

³CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Av. Nodo Servidor Público #165 Col. Anexa al Club de Golf, Las Lomas, Zapopan, 45136, Jalisco, México.

Autor de correspondencia: Carolina Reta, CONAHCYT–CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Gaza 30 Lote 1, Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, San Agustín Tlaxiaca, 42163, Hidalgo, México. E-mail: carolina.reta@ciateq.mx. ORCID: 0000-0002-0843-129X.

Recibido: 11 de Abril del 2024

Aceptado: 18 de Junio del 2024

Publicado: 19 de Julio del 2024

Resumen.- La soldadura por puntos de resistencia es una técnica común en la industria manufacturera, especialmente en el sector automotriz en México, debido a su versatilidad y facilidad de implementación. La evaluación de la calidad de estas soldaduras es crucial, y existen múltiples métodos para ello, lo que complica la elección del más adecuado. Este artículo presenta una revisión de la literatura centrada en métodos no destructivos para la confirmación de la calidad de la soldadura por puntos de resistencia. Se destacan técnicas como la inspección por ultrasonido, la termografía infrarroja y la visión por computadora, entre otras. La metodología empleada incluye un análisis comparativo de estudios recientes para identificar las mejores prácticas y aplicaciones en la evaluación de la calidad de la soldadura por puntos. Los resultados de esta revisión proporcionan una guía comprensiva para investigadores y profesionales, facilitando la selección de métodos adecuados para aplicaciones específicas.

Palabras clave: Calidad de soldadura; Resistencia de soldadura por puntos; Pruebas no destructivas; Inspección infrarroja; Visión por computadora.

Abstract.- Resistance spot welding is a common technique in the manufacturing industry, especially in the automotive sector in Mexico, due to its versatility and ease of implementation. The evaluation of the quality of these welds is crucial, and there are multiple methods for this, making the choice of the most suitable one complicated. This article presents a literature review focused on non-destructive methods for confirming the quality of resistance spot welding. Techniques such as ultrasonic inspection, infrared thermography, and computer vision, among others, are highlighted. The methodology employed includes a comparative analysis of recent studies to identify the best practices and applications in the quality assessment of spot welding. The results of this review provide a comprehensive guide for researchers and professionals, facilitating the selection of appropriate methods for specific applications.

Keywords: Welding quality; Spot welding resistance; Non-destructive testing; Infrared inspection; Computer vision.





1. Introducción

México cuenta con una amplia variedad de plantas manufactureras, y una parte importante de este sector está directamente relacionada con la industria automotriz. Esta industria se caracteriza por el uso de la soldadura por puntos de resistencia en la fabricación de carrocerías.

La alta competitividad que distingue a esta industria impulsa la necesidad constante de mejorar los procesos para asegurar la calidad de los productos. En este contexto, este trabajo presenta una revisión de la literatura sobre métodos de confirmación de calidad de soldadura por puntos, entre los que se encuentran: inspección por ultrasonido (sección 5.1), flujo magnético (sección 5.2), visión por computadora (sección 5.3), termografía infrarroja (sección 5.4), predicción de defectos empleando IA (sección 5.5), entre otros métodos híbridos (sección 5.6). Con ello, se busca proporcionar una visión integral de las herramientas y técnicas disponibles para su desarrollo y aplicación en la industria.

La revisión bibliográfica abarca artículos publicados mayoritariamente en los últimos cinco años. Sin embargo, también se incluyen trabajos de años previos debido a su contribución en el campo, lo que nos permite identificar el impacto de la investigación en esta disciplina y su relevancia para los avances en la industria automotriz.

2. Soldadura por puntos de resistencia

El proceso de soldadura por puntos de resistencia (RSW, por sus siglas en inglés, *Resistance Spot Welding*) consiste en la unión de dos o más láminas metálicas, mediante la aplicación de corriente eléctrica a través de los paneles. Para este tipo de soldadura se aprovecha la propiedad eléctrica de las láminas la cual consiste en oponerse al flujo de corriente, generando así la

fusión del metal con el calor producido, para obtener la soldadura [1].

Este proceso ofrece las siguientes ventajas: eficiencia económica, alta velocidad y adaptabilidad para la automatización [2]. Sin embargo, también presenta desventajas, como el traslape de las uniones y una baja resistencia mecánica a la tensión y fatiga [2]. Debido a sus ventajas, este proceso es ampliamente utilizado para la unión de láminas.

2.1 Principio de operación

El proceso de soldadura por RSW utiliza la aplicación controlada del flujo de corriente eléctrica en un tiempo determinado. Su funcionamiento se basa en el efecto Joule, el cual establece que cuando los electrones en movimiento de una corriente eléctrica impactan contra el material a través del cual están siendo conducidos, la energía cinética contenida en los electrodos es transformada en energía calorífica, dando como resultado la fusión de los materiales [3].

La cantidad de calor generada es proporcional al cuadrado de la corriente eléctrica y directamente proporcional a la resistencia eléctrica y el tiempo, como se muestra en la ecuación (1) [4].

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

donde:

Q = Calor generado (Joules).

I = Corriente, cantidad de electrodos que recorren el circuito por unidad de tiempo (Ampers).

R = Resistencia, oposición que ejerce un material al flujo de corriente (Ohms).

t = Tiempo, cantidad de tiempo durante el cual fluye la corriente eléctrica a través del conductor (Segundos).



Para llevar a cabo el proceso de soldadura por puntos, dos o más láminas metálicas son presionadas mediante electrodos, a través de los cuales se hace circular corriente eléctrica, generando el calentamiento de las zonas de contacto de la lámina y el electrodo, dando como resultado la unión de las láminas [5]. En la Figura 1 se puede observar dicho proceso.

Durante este proceso, se debe generar la cantidad de calor necesaria para fundir las láminas que se desean unir. A continuación, la unión se deja reposar el tiempo suficiente bajo la aplicación de cierta presión, con la finalidad de brindarle la resistencia mecánica necesaria para mantener la unión de las láminas. A ese metal fundido y posteriormente solidificado se le conoce comúnmente como botón de soldadura o huella. La forma y el tamaño de este varían según el

campo magnético inducido mediante el flujo de la corriente eléctrica [5].

2.2 Soldadura por RSW en la industria automotriz

El uso de la soldadura por RSW en la fabricación del ensamble estructural de los automóviles permite usar conjuntos de puntos de soldadura para transferir el impacto hacia la estructura del vehículo durante un choque [6]. Esta resistencia depende en gran medida de la integridad y desempeño mecánico del punto de soldadura [6]. El fallo en las uniones de soldadura afecta la rigidez estructural del vehículo; por lo tanto, la calidad de los puntos de soldadura es fundamental para determinar la seguridad y durabilidad de los vehículos.

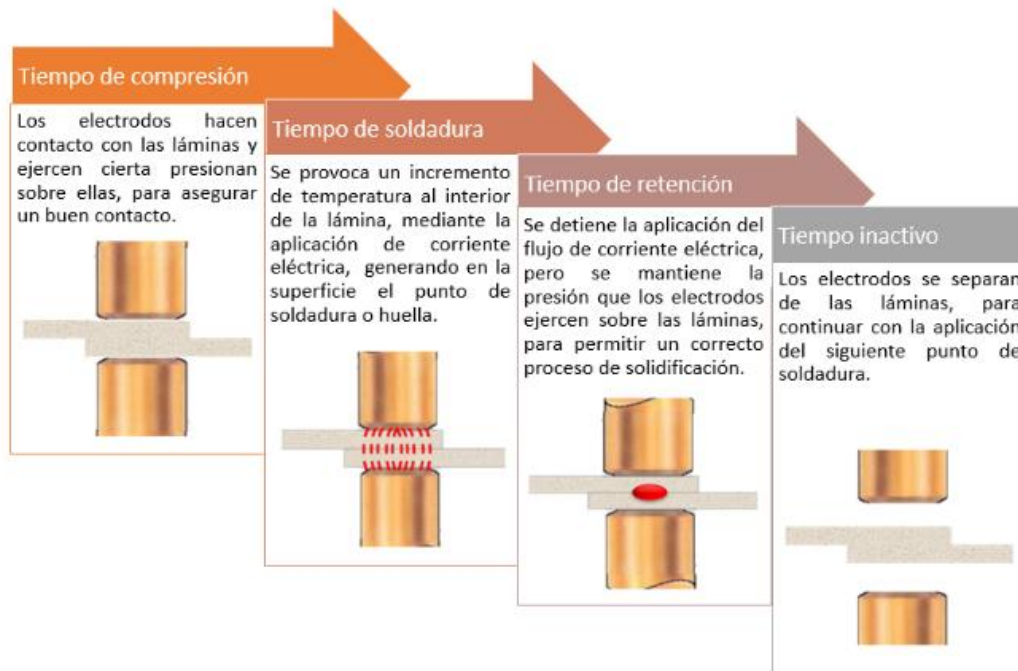


Figura 1. Proceso de soldadura por RSW.

Los defectos en la soldadura desencadenan una serie de eventos perjudiciales para el proceso de manufactura, puesto que representan pérdidas de tiempo por retrabajos y mayores costos de

producción [7]. En el proceso de carrocerías, los defectos más comunes son [8]: fractura, perforación, punto desprendido y rebaba, los cuales se muestran en la Figura 2.



Para evaluar la resistencia de los puntos de soldadura [6] se utilizan tres índices, mostrados en la Figura 3, los cuales son la base para monitorear la calidad de la soldadura dentro de los procesos productivos.

3. Control de calidad de la soldadura por RSW

El control de la calidad es un aspecto de gran importancia y cuidado por las empresas [9].

Por lo general, la calidad de la soldadura se determina con base en 5 criterios [8]: aspecto, tamaño, penetración, resistencia mecánica y discontinuidades internas.

Los métodos de inspección utilizados para la evaluación de la calidad de la soldadura por RSW pueden ser de dos tipos: destructivos y no destructivos. Por lo general, en las empresas se utilizan ambos métodos de inspección.



Figura 2. Principales defectos en la soldadura por RSW.

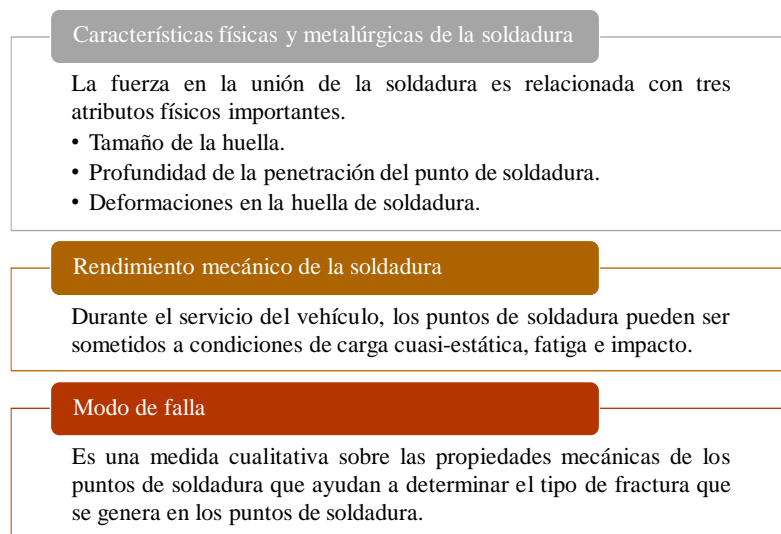


Figura 3. Índices para la evaluación de la calidad de la soldadura.

3.1 Ensayos destructivos

Los ensayos destructivos (DT, por sus siglas en inglés, Destructive Testing) implican la destrucción parcial o total de la pieza soldada con la finalidad de evaluar las propiedades mecánicas de la unión, como: la resistencia, la dureza y,

sobre todo, la fusión de las láminas. Hasta la fecha, estos métodos son los más confiables para garantizar la calidad en la unión de la soldadura [9].

La principal desventaja de las pruebas DT son el tiempo y el alto costo. Además, debido a su



naturaleza, esta prueba se realiza mediante un muestreo, lo cual conlleva un alto riesgo de fuga de defectivo en el proceso. En general, las pruebas DT se pueden clasificar en: mecánicas, químicas y metalográficas [10].

3.2 Ensayos no destructivos

Un ensayo no destructivo (NDT por sus siglas en inglés, Non Destructive Testing) es cualquier tipo de prueba aplicada a un material que no altera de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales [11]. Estos métodos basan su principio de funcionamiento en el uso de diferentes tipos de energía, para detectar de manera interna o visual defectos en el punto de unión de la soldadura. Sin embargo, los métodos de inspección no destructiva que se han desarrollado hasta la fecha no garantizan al 100% la calidad de la soldadura [9].

La **Error! Reference source not found.** enlista los principales tipos de ensayos no destructivos y sus correspondientes ventajas y desventajas [12]-[18].

4. Metodología

En este estudio, se llevó a cabo una revisión sistémica de la literatura científica sobre los métodos de prueba no destructivos para el proceso de soldadura por puntos. El objetivo del estudio es examinar el estado actual y los avances en este campo específico.

4.1 Esquema de búsqueda

Para la búsqueda de los artículos científicos, se empleó el siguiente procedimiento:

- *Definición de palabras clave.* Se realizó una selección de palabras clave en inglés, las cuales se determinaron con base en el objetivo de la investigación. Estas fueron: *Quality; Spot Welding; Destructive test; Nondestructive test.*
- *Búsqueda de literatura.* Estas *palabras clave* fueron empleadas como criterios de búsqueda en una variedad de plataformas académicas, incluyendo Scopus, Semantic Scholar, ResearchGate, ScienceDirect, Elsevier, MDPI, Redalyc, SciELO, y Dialnet. Esto con el fin de obtener una amplia perspectiva sobre el tema de estudio.
- *Selección extensa de artículos para revisión.* Esta selección consideró principalmente el criterio de avance en el desarrollo de nuevos métodos no destructivos. Esto con el fin de garantizar la inclusión de trabajos significativos y pertinentes para su revisión.
- *Recuperación de documentos para revisión.* Una vez seleccionados artículos relevantes, se procedió con la recuperación de los documentos completos para su posterior revisión, los cuales fueron descargados a través de las plataformas mencionadas.

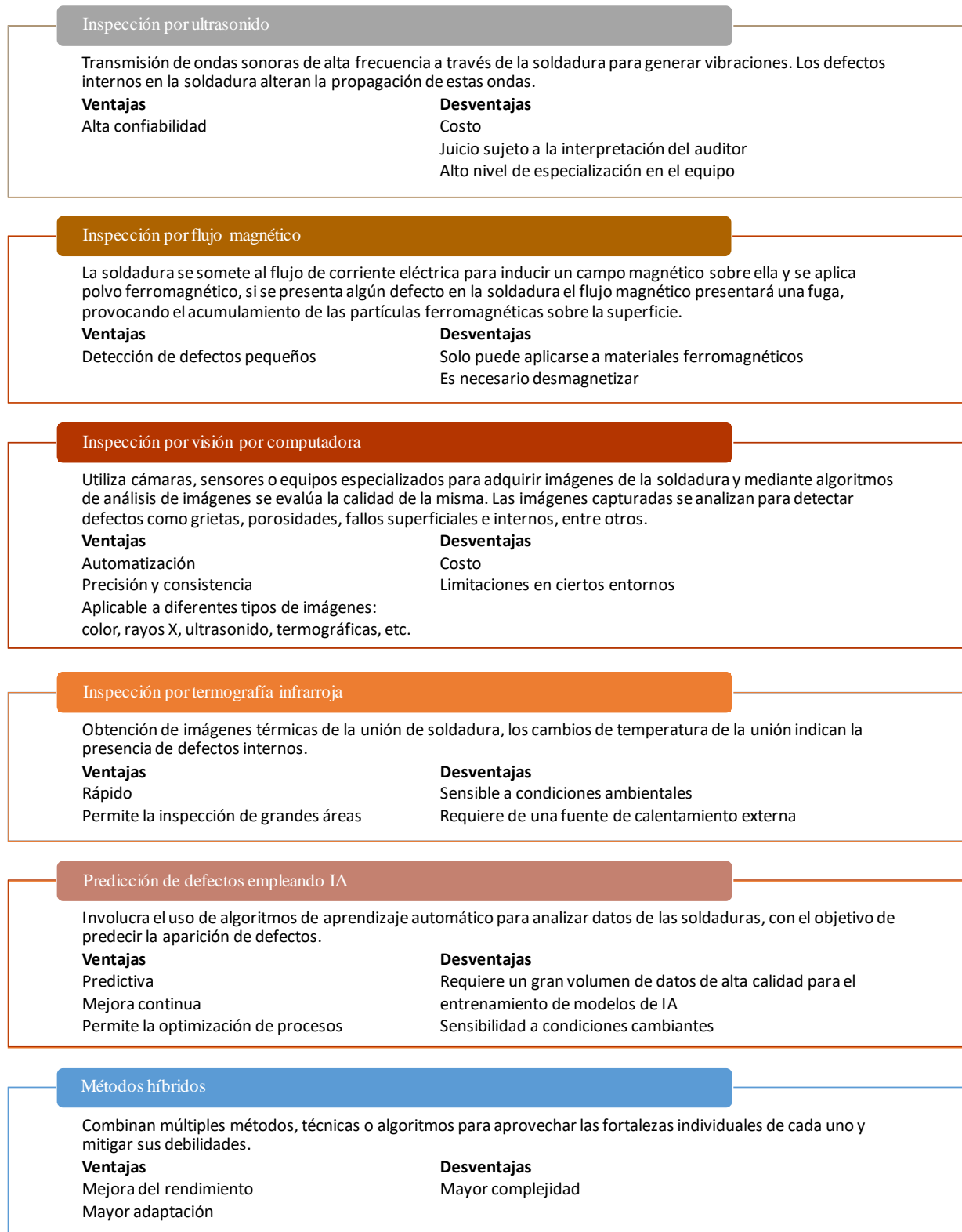


Figura 4. Tipos de ensayos no destructivos.



4.2 Esquema de revisión

La revisión de la literatura se realizó siguiendo un esquema de lectura de tres pasadas [19]. Este esquema permitió una revisión exhaustiva y profunda de los documentos, evitando una lectura lineal de principio a fin. Los pasos seguidos fueron:

- *Primera pasada.* Se realizó una lectura inicial para obtener una visión general de cada trabajo. Se revisaron el título, resumen, introducción y conclusiones para comprender el alcance y los objetivos del estudio. Los artículos que no estaban alineados con el tema de estudio fueron descartados en este punto.
- *Segunda pasada.* Se llevó una lectura más detallada del contenido de cada trabajo. Se exploraron los métodos utilizados, los resultados presentados y las discusiones realizadas, sin adentrarse en detalles específicos. Esto permitió identificar artículos relevantes para este estudio.
- *Tercera pasada.* Se realizó una lectura minuciosa y profunda del artículo. Se analizaron con detalle los métodos, resultados, discusiones, conclusiones y cualquier otro aspecto relevante para obtener una comprensión completa y precisa del trabajo. Este paso garantizó la inclusión de información relevante y la identificación de aspectos clave para el presente estudio, como se presenta en la sección 5.

Aunque no se adoptó la metodología PRISMA [20] en este estudio, debido a que es muy restrictiva para explorar la amplitud y diversidad de la literatura sobre el tema abordado, se reconoce que fue muy útil para el proceso de síntesis y análisis de resultados, presentado en las secciones 5 y 6.

5. Avances en la inspección no destructiva

La garantía de la calidad en los procesos de soldadura es fundamental tanto en la industria como en la academia, por lo cual se continúan estudiando y desarrollando nuevos métodos de inspección. En este contexto, la aplicación de técnicas NDT ha experimentado avances significativos, contribuyendo a la mejora continua de la calidad y la eficiencia en estos procesos. A continuación, se presentan los principales métodos de inspección NDT utilizados para evaluar la calidad de las soldaduras por puntos, destacándose por sus innovaciones y contribuciones.

5.1 Inspección por Ultrasonido

El ultrasonido ha sido ampliamente utilizado en la inspección de soldaduras por puntos debido a su capacidad para detectar defectos internos y evaluar la integridad estructural. Martín y col. (2007) probaron el uso de una red neuronal multicapa de retro propagación y avance, usando Matlab 6.1 para interpretar los oscilogramas ultrasónicos obtenidos por el ensayo ultrasónico. Para ello, desarrollaron un programa en Matlab que utilizó vectores obtenidos del oscilograma ultrasónico como entrada para la red neuronal artificial, los parámetros que se consideraron fueron, la microestructura interna y el tamaño del punto de soldadura, las cuales se clasificaron en cuatro tipos, buena soldadura, tamaño insuficiente de soldadura, soldadura de palo, y sin soldadura. El entrenamiento de la red fue mediante aprendizaje supervisado. Con este trabajo, los autores contribuyeron a la automatización de la clasificación de las soldaduras por RSW en niveles de calidad a través de sus respectivos oscilogramas obtenidos por ensayo ultrasónico [21].

Martín y col. (2014) usaron las técnicas de árbol de clasificación y regresión (CART) y bosque aleatorio como herramientas de reconocimiento



de patrones para la clasificación de oscilogramas ultrasónicos de uniones de RSW. Los resultados mostraron que los modelos CART produjeron una tasa de error aceptable con una alta interpretabilidad. La aportación de este trabajo fue el desarrollo de técnicas para la clasificación de oscilogramas ultrasónicos que permitieran reducir la carga de trabajo de los operadores humanos y reducir los errores en la interpretación de los resultados [22].

Liu y col. (2017) propusieron un método para identificar y clasificar automáticamente mediante una red neuronal de retro propagación las señales ultrasónicas. Para ello se analizan las señales de cuatro tipos de soldaduras por RSW, soldadura fallida, soldadura por adherencia, soldadura buena y soldadura defectuosa con poro de gas, en los dominios del tiempo, de la frecuencia y del tiempo-frecuencia basado en la transformada de paquetes de onda. La contribución de este trabajo fue el desarrollo de un método para realizar la identificación de los defectos de soldadura por RSW, cuya factibilidad fue verificada en el experimento [23].

Hua y col. (2019) desarrollaron un sistema de detección ultrasónica en sitio para evaluar la calidad de la soldadura por RSW automáticamente. Para ello se utiliza una sonda integrada en el electrodo para obtener los valores de la señal y se establecen modelos de cálculo matemático para realizar la evaluación ultrasónica cuantitativa de la calidad de la RSW y clasificar la calidad de la soldadura automáticamente. Este sistema demostró ser eficaz para la detección automática de la calidad mediante el uso del ultrasonido [24].

Amiri y col. (2020) probaron una nueva metodología para evaluar el comportamiento de las uniones soldadas por RSW ante la fatiga. Para ello se fabricaron muestras de tres láminas, las cuales se sometieron a ensayos por ultrasonido y

se extrajeron los datos de pulso-eco mediante el procesamiento de imágenes. Utilizando la simulación con redes neuronales artificiales y su optimización mediante algoritmos genéticos, permite evaluar la resistencia estática y la vida útil de las uniones RSW sometidas a fatiga. La aportación de esta investigación es el desarrollo de una metodología NDT que permita evaluar los puntos de soldadura ante la fatiga [25].

Ji y col. (2020) integraron un sistema de imagen ultrasónica de matriz de fase en un robot asistido para aplicaciones de soldadura por RSW. Este sistema utiliza una función de dual-time gate para inspecciones de soldaduras. Además, estudiaron los efectos de la presión de contacto de la sonda y el ángulo de incidencia del haz ultrasónico, lo que permitió determinar la presión de contacto y el ángulo de incidencia óptimos [26].

Ulbrich y Kanczurzevska (2022) presentaron un método predictivo de la calidad del nugget de soldadura. Para ello, determinaron la correlación entre la resistencia mecánica de una junta, medida en kN, y los parámetros seleccionados de la onda longitudinal ultrasónica con una frecuencia de 20 MHz. Este estudio determinó que existe una correlación fuertemente positiva entre el número de ecos inversos y la fuerza necesaria para destruir la soldadura por puntos, así como el diámetro del nugget de soldadura [27].

Ulbrich y col. (2023) emplearon transductores ultrasónicos para medir las ondas ultrasónicas de la superficie. Para soldaduras por puntos de baja calidad, la amplitud fue de alrededor del 25%; por el contrario, para soldaduras de alta calidad se logró una amplitud del 90%. Dependiendo del tamaño del nugget de soldadura, se transfiere una mayor o menor cantidad de energía de onda, lo que resulta en una amplitud más pequeña o grande del pulso ultrasónico. Esta investigación confirmó la viabilidad de emplear ondas de superficie para



evaluar con precisión el diámetro del nugget de soldadura [28].

5.2 Flujo magnético

Otra técnica destacada es el uso de flujo magnético, que ha demostrado ser eficaz en la evaluación de la calidad de las soldaduras por puntos. Tsukada y col. (2011) diseñaron un sistema basado en la fuga de flujo magnético a través de un sensor magneto resistivo. En el estudio el flujo magnético es inducido entre dos placas unidas, y se mide la fuga del flujo magnético con un componente tangencial paralelo a la superficie de la placa, obteniendo una imagen magnética mediante el uso de un escaneo bidimensional. La contribución de este estudio fue demostrar la correlación de este sistema con la prueba destructiva de corte [29].

Tsukada y col. (2013) desarrollaron una técnica combinada de flujo magnético y corrientes inducidas para la evaluación de calidad de la soldadura por RSW. Esta técnica consta de un par de sondas magnéticas que tienen una bobina de inducción y una bobina de detección, un amplificador de bloqueo, una fuente de corriente y una computadora. Para lo cual se mide la penetración del flujo magnético a través de ambas superficies en la soldadura con múltiples frecuencias. Esta técnica mostró una buena correlación con la prueba destructiva de cizallamiento [30].

Vértesy y Tomás (2018) sugirieron un método de prueba adaptativa magnética basada en la medición y evaluación sistemática de bucles de histéresis menores, como una caracterización simple, fiable y sensible de los puntos soldados. El método se basa en el hecho de que el proceso de soldadura tiene una gran influencia en la microestructura del área soldada, lo que modifica las propiedades magnéticas. Gracias a esta investigación se encontró una buena correlación entre el resultado de la caracterización destructiva

y los descriptores magnéticos no destructivos [31].

Ma y col. (2022) propusieron el uso de la imagen magnetoóptica bajo un magnético combinado vertical para la detección de defectos de soldadura de cualquier forma y distribución. Para demostrarlo, se comparan los resultados experimentales de la imagen magnetoóptica de los defectos de soldadura excitados por un campo magnético combinado vertical con diversos tipos de campos magnéticos. Este método contrarresta la limitación de los métodos magnéticos tradicionales, donde los defectos de micro soldadura paralelos a la dirección del campo magnético pueden pasar desapercibidos [32].

5.3 Visión por Computadora

La visión por computadora ha emergido como una herramienta poderosa para la inspección de soldaduras por puntos. Ruisz y col. (2007) presentaron un método para la evaluación de la calidad de las soldaduras por RSW, basada en métodos de visión por computadora, que permiten un procesamiento no destructivo en línea y en tiempo real. La entrada del sistema es la imagen de una huella de soldadura sobre una banda metálica que cubre los electrodos contra el desgaste y la suciedad. La forma y el tamaño de las estructuras dentro de la huella se correlacionan con el área del cordón y, por lo tanto, permiten una estimación precisa de la calidad de la soldadura por puntos. El algoritmo desarrollado segmenta la huella del electrodo y calcula el área del cordón a partir del eje mínimo y máximo de una elipse ajustada. Este trabajo contribuye con la automatización de la inspección visual de la huella de soldadura, permitiendo la detección en tiempo real [33].

Zhang y col. (2015) establecieron un método visual y fiable para la evaluación de la calidad de las soldaduras por resistencia. Para ello se midió y analizó la señal de desplazamiento del electrodo



extrayendo las características estadísticas relacionadas con la calidad de la soldadura. Estas características se representaron con una cara de Chernoff que caracteriza la calidad de la soldadura a través de expresiones faciales, asociadas a cuatro niveles de calidad, pobre, buena, excelente y repulsión. La aportación de este trabajo fue el desarrollo de un método de identificación visual preciso y rápido de la calidad de la soldadura [34].

Deniz y Cakir (2018) diseñaron un sistema robótico de medición en línea para el control de calidad de la soldadura por puntos automático. El diseño consiste en la instalación de una cámara estereoscópica y una sonda de control ultrasónica en el robot. La posición central del punto de soldadura se determina mediante la cámara y la calidad de la soldadura se verifica mediante la sonda de prueba. En este artículo se presenta un nuevo método de calibración mano-ojo basado en soluciones analíticas simples y de forma cerrada, donde la función objetivo se define como la reducción de la desviación en la proyección del punto, en lugar de reducir el error en la ecuación de calibración. Para aumentar la fiabilidad, se ha sugerido combinar los resultados de los algoritmos de centrado existentes para la detección del centro de soldadura por puntos fuertemente deformados [35].

Xia y col. (2019) presentaron un nuevo enfoque para la evaluación en línea través del sistema de cámara de alta velocidad y monitoreo multi sensorial de la intensidad de expulsión. Las señales de proceso consideradas son la resistencia dinámica, la fuerza del electrodo y el desplazamiento del electrodo, las cuales se monitorean y estudian comparativamente de manera simultánea. Este estudio contribuye al control en línea de la expulsión de soldadura en el proceso [36].

Dai y col. (2021) propusieron la mejora del modelo de inspección visual de puntos de soldadura *You Only Look Once* (YOLO), para ello se introdujo la red MobileNetV3 para reemplazar la red principal de YOLOv3 y garantizar la precisión y el rendimiento en tiempo real; para mejorar la capacidad de detección de objetos pequeños, se propone una red piramidal de características. Por último, teniendo en cuenta las deficiencias de la pérdida de proporción de intersección y unión (IoU), se utiliza la pérdida de IoU completa (CIoU) para mejorar la velocidad de convergencia y la precisión de regresión. Con este trabajo se contribuyó con la mejora del modelo de inspección visual para soldadura por RSW, los resultados cuantitativos sobre el conjunto de datos de soldadura por puntos muestran que el enfoque propuesto logra resultados exitosos para la inspección visual de soldadura por RSW [37].

Alghannam y col. (2019) aplicaron una mejora en la estimación de la calidad de la superficie del nugget de soldadura utilizando métodos de procesamiento de imágenes y entrenando un sistema de inferencia difusa. Esto permite crear la topografía de la superficie del nugget y mostrarla como un modelo 3D basado en las características geométricas extraídas de cada punto. Los resultados concluyen que la estimación del modelo 3D de la superficie de la soldadura y la calidad de la soldadura pueden alcanzar una mayor precisión [38].

Li y col. (2019) usaron dos cámaras CCD para la implementación de un sistema de tipo no contacto para la medición de la alineación de los electrodos. Como resultado de este estudio se obtuvo una rápida y precisa medición del desalineamiento durante el proceso de soldadura, permitiendo dar feed back inmediato [39].

Zheng y col. (2019) desarrollaron un nuevo método de inspección basado en la segmentación semántica. Para ello, eligieron MobileNetV2



como la estructura principal para la segmentación. Después de la modificación y optimización de la red, su modelo logra una precisión del 89% de intersección de la unión media, lo que representa un aumento promedio del 30% en comparación con los algoritmos clásicos de segmentación [40].

Cannabrava y col. (2022) diseñaron un sistema de inspección de calidad, integrado por un robot colaborativo y un sistema de visión desde una perspectiva de Internet Industrial de las Cosas, mediante el uso de inteligencia artificial y sistemas de visión para la inspección de puntos de soldadura. Este trabajo mostró contribuciones directas al presentar posibles algoritmos que pueden ser utilizados para la inspección de puntos de soldadura de manera automatizada [41].

5.4 Termografía Infrarroja

La termografía es otra técnica prometedora que se ha abordado para la evaluación de la calidad de las soldaduras por puntos. Esta técnica se basa principalmente en el uso de la radiación infrarroja direccionada. Forejtoová y col. (2019) usaron la aproximación del ensayo ultrasónico para evaluar la confiabilidad del ensayo termográfico en un modelo de inspección en línea. Después de realizar el estudio se demuestra que la termografía infrarroja puede encontrar errores sistemáticos en el proceso que no son detectables por otros métodos de NDT mediante un análisis de diferentes caídas de temperatura medidas después de un tiempo de retraso constante causado por diferentes dinámicas de enfriamiento [42].

Santoro y col. (2024) presentan una innovadora tecnología de inspección no destructiva basada en termografía activa para evaluar la calidad de la soldadura. Al emplear una fuente de calor láser modulada en frecuencia, se analiza la señal térmica que atraviesa la sección de la junta soldada. La metodología propuesta muestra potencial para pruebas en línea de soldadura por RSW, ofreciendo una automatización fácil y

permitiendo la correcta clasificación de juntas soldadas por puntos [43].

5.5 Predicción de defectos empleando IA

La predicción de defectos mediante técnicas de machine learning y análisis estadístico ha ganado relevancia en la evaluación de la calidad de las soldaduras por puntos. Pereda y col. (2015) realizaron un estudio para identificar el mejor método para predecir el nivel de calidad de las uniones RSW, a través de análisis de varianza (ANOVA) y prueba de rango múltiple nuevo de Duncan y Waller-Duncan, para calcular la significación de los resultados de los métodos evaluados. La contribución de este trabajo fue la identificación de los parámetros más relevantes para las técnicas de predicción de defectos [44].

Pashazadeh y col. (2016) identificaron los principales parámetros de soldadura que afectan la dimensión del núcleo de soldadura, tanto el diámetro como la penetración, utilizando el diseño factorial completo de experimentos. Luego, utilizando una combinación híbrida de redes neuronales artificiales y algoritmo genético multiobjetivo, se especificaron los valores óptimos de los parámetros mencionados. Esta investigación permitió estimar el número admisible de los puntos de soldadura que se pueden aplicar, antes de hacer el limado del electrodo [45].

Boersch y col. (2016) propusieron un enfoque simple y directo que utiliza técnicas de minería de datos para predecir con precisión el diámetro de soldadura a partir de los datos registrados durante el proceso de soldadura. La predicción del diámetro de soldadura mediante el monitoreo en el proceso de una manera confiable permitiría la documentación de calidad de las uniones durante el proceso de soldadura y además conduciría a una disminución sustancial del consumo del electrodo, teniendo un impacto importante en la economía del proceso. Se realizó el análisis en



más de 3000 soldaduras clasificadas utilizando el modelo de árbol como predictor, obteniendo una tasa de éxito del 93% [46].

Zhou y col. (2022) desarrollaron un método basado en machine learning (ML) que permite analizar secuencias recolectadas de líneas de manufactura en funcionamiento. Al capturar dependencias a lo largo de secuencias de instancias de soldadura, este método permite predecir la calidad de operaciones de soldadura futuras antes de que ocurran. Para ello, se desarrollaron doce tuberías de ML en dos dimensiones: ajustes de ingeniería de características y métodos de ML. Se consideraron 4 ajustes de características y 3 métodos de ML: regresión lineal, perceptrón multicapa y regresión de vectores de soporte, obteniendo resultados prometedores [47].

Hu y col. (2022) usaron la inteligencia artificial para mejorar el rendimiento y la eficiencia de la evaluación de calidad de la soldadura por puntos. Este estudio propuso un método de fusión de múltiples señales que se realizó combinando análisis de componentes principales y análisis de correlación. Además, se optimizó un modelo de red neuronal de retro propagación utilizando el algoritmo de búsqueda de gorrión mejorado por mapa caótico senoidal, demostrando tener un mejor rendimiento para predecir con éxito defectos en las soldaduras [48].

Shao y col. (2023) desarrollaron un modelo de predicción de calidad de RSW utilizando el algoritmo de optimización de saltamontes mejorado combinado con el algoritmo de red neuronal de regresión generalizada. Los parámetros del proceso actual, incluida la corriente de soldadura, el voltaje de soldadura, la energía, la potencia y el ancho de pulso, se utilizaron como entradas para predecir el diámetro del nugget. A través del muestreo de Bootstrap, se llevó a cabo un experimento de comparación

sobre el efecto de predicción del modelo propuesto de predicción de calidad con métodos anteriores. El análisis de los resultados experimentales llevó a la conclusión de que la precisión del modelo propuesto de predicción de calidad de soldadura es mayor [49].

5.6 Métodos Híbridos

Además de los métodos mencionados anteriormente, existen otras técnicas de inspección que se han utilizado para evaluar la calidad de las soldaduras por puntos. Estas técnicas complementarias ofrecen diferentes enfoques y ventajas en términos de detección de defectos y evaluación de la integridad estructural de las soldaduras. Zhou y Cai (2013) diseñaron un sistema de control integrado en tiempo real para la soldadura por RSW, que sea capaz de producir soldaduras con diámetros de núcleo predeterminados. El sistema propuesto consta de un controlador de corriente constante que se utiliza para garantizar la consistencia de la formación y el crecimiento del núcleo durante el proceso de soldadura, y de un estimador en línea del diámetro del núcleo basado en una función matemática de la energía térmica absorbida por la soldadura. Con este sistema, se detiene el proceso de soldadura cuando la diferencia entre el diámetro real del núcleo y el valor deseado predeterminado esté dentro de una tolerancia determinada [50].

Zhang y col. (2015) presentaron un método efectivo de evaluación no destructiva para la calidad de soldadura por RSW mediante el uso de la técnica de árbol de decisiones y su representación gráfica en forma de radar. Este método monitorea la señal de desplazamiento del electrodo durante el proceso de soldadura y las clasifica mediante un árbol de decisiones para construir un clasificador y proporcionar un procedimiento de diagnóstico visible e intuitivo para la evaluación de la calidad de la soldadura.



Los resultados de prueba del clasificador del árbol de decisiones muestran que es factible y confiable evaluar la calidad de la soldadura basándose en las características gráficas del gráfico de radar, además este trabajo muestra que las características y la calidad de la soldadura están estrechamente relacionadas [51].

Xing y col. (2017) propusieron un esquema para el monitoreo de calidad en línea del proceso de soldadura por RSW para determinar eficazmente la tasa de calidad de las soldaduras por puntos. En este trabajo, se llevó a cabo una clasificación con Random Forest utilizando señales de resistencia dinámica que fueron recolectadas y procesadas en el entorno de producción. Los resultados obtenidos demostraron que este modelo distinguió adecuadamente las soldaduras de alta calidad [52].

Dai y col. (2022) plantearon la evaluación de la calidad de la soldadura por RSW basado en señales de resistencia dinámica. Para ello se desarrolló una red neuronal convolucional unidimensional con un mecanismo de atención de canal para mejorar el rendimiento de la clasificación. Extensos experimentos corroboran que la red propuesta produce un rendimiento de clasificación notable en comparación con los algoritmos típicos en varios conjuntos de datos RSW recopilados en una línea de producción real. Este estudio proporciona una referencia valiosa para lograr un sistema inteligente de inspección de calidad en línea en la industria de fabricación automatizada [53].

Wen y Jia (2023) diseñaron un sistema de monitoreo en tiempo real para monitorear las señales eléctricas y mecánicas durante el proceso de soldadura por RSW, para reconocer los fenómenos de expulsión de soldadura. Para ello se construyeron cuatro modelos de estimación basados en el análisis de regresión y la red neuronal de retro propagación. Los resultados

mostraron que la precisión de la estimación de la red neuronal de retro propagación fue mayor que el modelo de análisis de regresión [54].

Xiaoyun y col. (2006) presentaron un método de inspección en línea de calidad de soldadura basado en la indentación del electrodo. Esta se extrae del codificador servo y se calibra mediante un sistema de recolección de datos de PLC que incluye un sensor de desplazamiento láser y un convertidor A/D, permitiendo que dicha indentación, extraída del codificador servo, refleje la variación de la calidad real de la soldadura [55].

Younes y col. (2020) proporcionaron una mejora significativa en la teoría y prácticas para diseñar una estación de inspección robotizada para RSW en las plantas de fabricación de automóviles utilizando procesamiento de imágenes y máquina de soporte vectorial difusa. El procesamiento de imágenes mejorado mostró un buen rendimiento en la clasificación de los modos de fallo y en el manejo del ruido de la imagen. Los resultados experimentales demostraron una mejora de la evaluación de calidad automática y en tiempo real de las superficies de RSW [56].

Wang (2021) desarrolló un método basado en el modelo oculto de Markov que utiliza la relación entre las formas de onda monitoreadas de la corriente, el voltaje y la presión con la calidad de la soldadura. Al aplicar este modelo, la precisión promedio de clasificación de la calidad es superior al 75%, lo que indica que este método es factible y efectivo [57].

Liu y col. (2022) establecieron un modelo de simulación por elementos finitos para la prueba no destructiva ultrasónica de soldadura por puntos en láminas de tres capas de bajo carbono y espesor igual. Este experimento verificó la correlación del modelo de simulación por elementos finitos y el modelo de cálculo matemático, lo que es de gran importancia para la tecnología de inspección



automática ultrasónica de soldadura por puntos [58].

Martín y col. (2022) demostraron que el uso combinado de los parámetros intrínsecos del proceso de soldadura combinado con las variables de pruebas no destructivas ultrasónicas puede mejorar significativamente los algoritmos para la predicción de los defectos. Para el experimento se usó el apilamiento de modelos de árboles como clasificadores a través de análisis de importancia de variables [59].

Pham y col. (2022) desarrollaron un sistema de escaneo acústico, SAM (Scanning Acoustic Microscopy) para evaluar la calidad de las uniones RSW. Para ello se utilizó un transductor enfocado de 50 MHz para evaluar la forma y tamaño y se prepararon especímenes con diferentes parámetros de entrada para ser probados por el sistema. El uso de este sistema permitió determinar los parámetros de entrada óptimos para soldar dos láminas de acero inoxidable SUS 316 de 1.5 mm de espesor. Además, se determinó que el sistema SAM es conveniente para examinar la calidad de la soldadura demostrando ser un sistema de manipulación sencilla y de tiempo de operación reducido [60].

Acebes y col. (2023) desarrollaron un sistema robótico para la inspección de la soldadura por puntos en tiempo real, para ello se usó un sistema de inspección basado en la propagación ultrasónica, utilizando visión e inteligencia artificial. Los resultados logrados en piezas reales demostraron que este sistema tiene una mejor capacidad de detección de defectos que los sistemas actuales en el mercado, teniendo la ventaja de ser instalado en las líneas de ensamblaje, optimizando los tiempos de inspección [61].

Zhou y col. (2023) presentaron un método de evaluación en línea de la calidad de la soldadura

por RSW basado en un algoritmo de incrustación lineal local. Durante las pruebas de soldadura, se recopilaron simultáneamente el voltaje y la corriente para calcular la señal de potencia de soldadura. La señal de potencia dinámica fue sometida a un proceso de incrustación lineal local y extracción manual de características. Las características recopiladas se utilizaron como entrada para construir modelos de bosque aleatorio y modelos de CatBoost para la evaluación en línea de la calidad de la soldadura, respectivamente. Los resultados muestran que los modelos de clasificación con volúmenes de características construidos por incrustación lineal local como entrada tienen una mayor precisión de evaluación que las características extraídas manualmente [62].

6. Resultados

6.1 Resumen de métodos NDT

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los métodos no destructivos más relevantes encontrados en la revisión de la literatura, mostrada en la sección anterior, el cual facilita su identificación.

6.2 Análisis de resultados

Enseguida se destacan aspectos relevantes del estudio desarrollado.

- *Parámetros significativos en la calidad de soldadura RSW.* La mayoría de los estudios consideran el tamaño de la huella o la penetración del punto de soldadura como los parámetros más significativos para determinar la calidad de la soldadura por RSW. Estos criterios se han convertido en pilares fundamentales para evaluar y garantizar la integridad de las uniones soldadas en la industria automotriz [63].



- *Avances en métodos de confirmación de RSW.* Se continúan haciendo importantes avances en los métodos de confirmación de RSW, los cuales se centran en los ensayos no destructivos y están enfocados principalmente en la aplicación de redes neuronales y sistemas de visión, con la finalidad de aumentar la velocidad de respuesta, así como brindar un monitoreo en tiempo real, acorde con la tendencia de la industria 4.0 [47] [61].
- *Tendencia en el campo de estudio.* Dentro de la investigación se detectó que los métodos que menos se han desarrollado en los últimos años son el termográfico y el magnético. Por el contrario, los estudios actuales están

conformados en su mayoría en el uso integral de diversos métodos apoyados en la inteligencia artificial. Esto se debe al creciente desarrollo de aplicaciones industriales, principalmente en el monitoreo de la calidad de los procesos.

- *Limitaciones.* A pesar de los avances significativos en el desarrollo de nuevos métodos de inspección no destructivos, aproximadamente el 50% de estos aún no han sido probados en una línea de producción. Por lo tanto, pueden presentar limitaciones técnicas para su implementación en planta.

Tabla 1. Resumen de los métodos de inspección NDT (parte 1 de 4).

Tipo	Técnica	Objetivo	Parámetros	Ref.
Ultrasonico	Red neuronal multicapa de retro propagación y avance.	Clasificación automatizada de oscilogramas ultrasónicos.	Microestructura interna. Tamaño del punto de soldadura.	[21]
	Árbol de clasificación y regresión, bosque aleatorio.	Desarrollo de técnicas para la clasificación de oscilogramas ultrasónicos.	Atenuación del haz ultrasónico.	[22]
	Red neuronal de retro propagación.	Identificación y clasificación inteligente de los defectos de soldadura por RSW.	Señales en el dominio del tiempo. Señales en el dominio de la frecuencia. Señales en el dominio tiempo-frecuencia.	[23]
	Análisis mediante modelos de cálculo matemático, con la integración de una sonda al electrodo.	Sistema de detección ultrasónica en sitio para la evaluación automática de calidad de soldadura por RSW.	Amplitud de la presión acústica. Distancia de los ecos. Frecuencia principal. Amplitud de la frecuencia principal. Componente de baja frecuencia.	[24]
	Simulación con redes neuronales mediante el procesamiento de imágenes y su optimización a través de algoritmos genéticos.	Evaluación del comportamiento de uniones soldadas por RSW ante la fatiga.	Amplitud de onda. Fase de onda.	[25]
	Sistema de imagen ultrasónica de matriz de fase en un robot asistido para aplicaciones de RSW.	Inspección de la calidad de la soldadura por RSW.	Presión de contacto de la sonda y el ángulo de incidencia del haz ultrasónico.	[26]



Tabla 1. Resumen de los métodos de inspección NDT (parte 2 de 4).

Tipo	Técnica	Objetivo	Parámetros	Ref.
Ultrasónico	Estudio comparativo entre el método destructivo de corte y el método ultrasónico.	Predicción de la calidad del punto de soldadura.	Resistencia mecánica y el número de ecos inversos.	[27]
	Transductores ultrasónicos.	Evaluar con precisión el diámetro del Nuggets de soldadura.	Amplitud de onda en la superficie.	[28]
Magnético	Imagen magnética mediante escaneo bidimensional.	Demostrar la correlación de este método con la prueba destructiva de corte.	Fuga de flujo magnético a través de un sensor magneto resistivo.	[29]
	Flujo magnético y corrientes inducidas.	Evaluación de calidad de la soldadura por RSW de cizallamiento.	Penetración del flujo magnético a través de ambas superficies en la soldadura con múltiples frecuencias.	[30]
	Prueba adaptativa magnética.	Determinar la correlación entre el valor de la corriente de soldadura y los descriptores magnéticos.	Histéresis magnética.	[31]
	Imagen magneto óptica.	Detección de defectos de soldadura en cualquier forma y distribución.	Campo de fuga magnético.	[32]
Visual	Métodos de visión por computadora, que permiten un procesamiento no destructivo en línea y en tiempo real.	Automatización de la inspección visual de la huella de soldadura, permitiendo la detección en tiempo real.	Segmentación de la huella del electrodo y cálculo del área del cordón a partir del eje mínimo y máximo de una elipse ajustada.	[33]
	Caras de Chernoff.	Desarrollo de un método de identificación visual preciso y rápido.	La señal del desplazamiento de electrodo.	[34]
	Cámara estereoscópica y una sonda ultrasónica instalada en el robot.	Diseñar un sistema robótico de medición en línea para el control de calidad de la soldadura por puntos automático.	Posición central del punto. La amplitud de onda.	[35]
	Asociación de generación de rebabas con parámetros del proceso.	Evaluación en línea de la expulsión (rebabas) de soldadura.	Resistencia dinámica. Presión del electrodo. Desplazamiento de electrodo.	[36]
	Mejora del modelo <i>You Only Look Once</i> YOLOv3.	Mejorar el rendimiento en tiempo real de la inspección de pequeños puntos de soldadura por RSW.	Posición del punto. Tamaño del punto. Forma del punto.	[37]



Tabla 1. Resumen de los métodos de inspección NDT (parte 3 de 4).

Tipo	Técnica	Objetivo	Parámetros	Ref.
Visual	Procesamiento de imágenes y entrenamiento de un sistema de inferencia difusa.	Mejorar la estimación de la calidad de la superficie del nugget de soldadura.	Características geométricas extraídas de cada punto.	[38]
	Uso de dos cámaras CCD.	Predicción de la calidad de la soldadura en tiempo real.	Alineación de los electrodos.	[39]
	Segmentación semántica.	Inspección de la calidad de la soldadura en línea.	Características geométricas del punto de soldadura.	[40]
	Inteligencia artificial y sistemas de visión.	Sistema de inspección de calidad integrado automático.	Características geométricas del punto de soldadura.	[41]
Termográfico	Aproximación del ensayo ultrasónico.	Evaluar la confiabilidad del ensayo termográfico en un modelo de inspección en línea.	Caídas de temperatura.	[42]
	Termografía activa.	Evaluar la calidad de la soldadura.	La señal térmica.	[43]
Predicción de defectos	Análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Duncan y Waller Duncan.	Predecir la calidad de las uniones de soldadura por RSW.	Corriente de soldadura. Tiempo de soldadura. Presión de los electrodos. Material y tratamiento del electrodo.	[44]
	Combinación híbrida de redes neuronales y algoritmo genético multiobjetivo a través del diseño factorial completo de experimentos.	Estimar el número admisible de puntos de soldadura que se pueden aplicar, antes de realizar el limado del electrodo.	Corriente de soldadura. Tiempo de soldadura. Presión de los electrodos.	[45]
	Minería de datos utilizando modelo de árbol como predictor.	Predecir el diámetro de soldadura a partir de los datos registrados durante el proceso de soldadura.	Temperatura del flujo hacia adelante, de retorno, y su diferencia. El voltaje, la fuerza, la corriente, la triangulación láser parte superior y parte inferior, así como su diferencia.	[46]
	Machine learning.	Predecir la calidad de operaciones de soldadura.	Secuencias recolectadas de líneas de manufactura en funcionamiento.	[47]
	Red neuronal de retro propagación utilizando el algoritmo de búsqueda de gorrión.	Mejorar el rendimiento y la eficiencia de la evaluación de calidad de la soldadura por puntos.	Componentes principales y análisis de correlación.	[48]



Tabla 1. Resumen de los métodos de inspección NDT (parte 4 de 4).

Tipo	Técnica	Objetivo	Parámetros	Ref.
Predicción de defectos	Algoritmo de optimización de saltamontes mejorado combinado con el algoritmo de red. neuronal de regresión generalizada.	Predicción del diámetro del nugget.	Corriente de soldadura, el voltaje de soldadura, la energía, la potencia y el ancho de pulso.	[49]
	Sistema de control integrado.	Producir soldaduras con determinados diámetros de núcleo.	Resistencia dinámica. Corriente de soldadura.	[50]
Métodos híbridos	Árbol de decisiones y gráfica de radar.	Mostrar que es factible y confiable evaluar la calidad de la soldadura basándose en un gráfico de radar.	Señal de desplazamiento del electrodo.	[51]
	Random forest.	Monitoreo de calidad de soldadura por RSW en línea.	Señales de resistencia dinámica.	[52]
	Red neuronal convolucional unidireccional.	Proporcionar una referencia para un sistema inteligente de inspección de calidad en línea.	Señales de resistencia dinámica.	[53]
	Análisis de regresión y red neuronal de retro propagación.	Comparación del análisis de regresión de la red neuronal de retro propagación.	Señales eléctricas y mecánicas.	[54]
	Sistema de PLC, un sensor de desplazamiento láser y un convertidor A/D.	Método de inspección en línea de calidad de soldadura.	Indentación del electrodo.	[55]
	Procesamiento de imágenes y máquina de soporte vectorial difusa.	Mejora de la evaluación de calidad automática.	Características geométricas del punto de soldadura.	[56]
	Modelo oculto de Markov.	Determinar la relación entre las formas de onda y la calidad de la soldadura.	Formas de onda de la corriente, el voltaje y la presión.	[57]
	Simulación por elementos finitos.	Comprobar la correlación del modelo por elementos finito con el modelo matemático.	Amplitud de onda.	[58]
	Apilamiento de modelos de árboles como clasificadores a través de análisis de importancia de variables.	Mejorar los algoritmos para la predicción de los defectos.	Parámetros intrínsecos del proceso y las variables de pruebas no destructivas ultrasónicas.	[59]
	Transductor enfocado de 50 MHz.	Desarrollar un sistema de escaneo acústico.	Forma y tamaño del punto de soldadura.	[60]
	Sistemas de visión e inteligencia artificial.	Inspección de la soldadura por puntos en tiempo real.	Propagación ultrasónica.	[61]
	Algoritmo de incrustación lineal local.	Evaluación en línea de la calidad de la soldadura.	El voltaje y la corriente.	[62]



6. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una revisión exhaustiva de los diversos métodos disponibles para evaluar la calidad de la soldadura por puntos de resistencia, abordando los diferentes métodos y los distintos parámetros empleados para su evaluación.

A pesar de la variedad de parámetros utilizados para determinar la calidad de la soldadura por puntos, el diámetro del punto de soldadura continúa siendo considerado fundamental, por lo cual, es uno de los que más atención se le presta.

Además, se observa un incremento significativo en el desarrollo de métodos que emplean inteligencia artificial para evaluar la calidad de la soldadura por puntos. Estos enfoques (visión por computadora y predicción de defectos empleando IA) aprovechan algoritmos avanzados para analizar imágenes de las soldaduras, detectar posibles defectos y evaluar la integridad estructural de los puntos de soldadura. La IA ofrece una capacidad de detección rápida y precisa, lo que permite la implementación de sistemas de inspección en línea para monitorear la calidad de las soldaduras en tiempo real durante la producción, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de fabricación. Algo a considerar es que, en los métodos de visión por computadora, su desempeño puede ser sensible a las condiciones de iluminación y a la calidad de la imagen, lo que puede afectar su precisión. Y para el caso de los métodos que emplean IA, se debe tener en cuenta que requieren una gran cantidad de datos de entrenamiento y la interpretación de los resultados puede ser compleja.

En cuanto a la inspección por ultrasonido, esta ofrece alta sensibilidad para detectar defectos internos mediante el análisis de las ondas ultrasónicas que se propagan a través del material soldado; sin embargo, requiere acceso a ambas

caras de la soldadura, lo que puede ser limitante en algunas situaciones.

En el caso del análisis por flujo magnético, detecta discontinuidades superficiales o subsuperficiales mediante la aplicación de un campo magnético y la observación de las líneas de flujo alteradas por posibles defectos, no obstante, su sensibilidad puede ser afectada por la orientación del campo magnético, lo que puede limitar su efectividad en ciertos escenarios.

Analizando la termografía infrarroja, este método ofrece una detección rápida y no destructiva de irregularidades en la distribución de la temperatura superficial de las soldaduras, lo que puede indicar la presencia de defectos internos o discontinuidades; sin embargo, su sensibilidad puede ser afectada por las variaciones de temperatura ambiental, lo que puede complicar su aplicación en ciertos entornos.

Considerando las características de los métodos mencionados anteriormente, algunos trabajos hacen uso de una mezcla de estos, obteniendo métodos híbridos, los cuales combinan varias técnicas de inspección para aprovechar las ventajas de cada una, mejorando el rendimiento general en la detección y caracterización de defectos en las soldaduras. Aunque con esto, es posible que se requieran equipos y habilidades especializadas, así como una mayor complejidad en la interpretación de resultados.

Cada uno de estos métodos tiene sus propias ventajas y limitaciones, y su selección depende de factores como la naturaleza de la soldadura, los requisitos de calidad y las capacidades disponibles en el entorno de fabricación.

Este estudio proporciona al lector una visión completa de los métodos de confirmación de calidad de la soldadura por puntos, así como una



comprensión de las tendencias actuales en la investigación y las áreas de desarrollo futuro.

7. Agradecimientos

Se agradece especialmente a CONAHCYT por los fondos otorgados a través de la beca nacional que permitió la realización de los estudios de maestría del primer autor.

8. Reconocimiento de Autoría

Jazmín Monserrat Rodríguez Torres: Conceptualización, Metodología, Investigación, Borrador original. *Carolina Reta:* Conceptualización, Metodología, Investigación, Revisión y edición. *Francisco Javier Ibarra Villegas:* Conceptualización, Metodología, Investigación, Revisión y edición.

Referencias

- [1] M. Hamed y A. M., «A review of electrical contact resistance modeling in resistance,» *Weld World*, vol. 61, n° 1, pp. 269-290, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
- [2] A. W. Society, Manual para la certificación de inspectores de soldaduras, Florida: American Welding Society, 2013. [En línea] <https://app.aws.org/certification/docs/QC1-2007-Spanish.pdf> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [3] F. J. Bueche y E. Hecht, Física general Shaum, Distrito Federal: Mc Graw Hill, 2007.
- [4] A. G. C. O'Brien, Welding Handbook, Florida: American Welding Society, 2007. [En línea] https://pubs.aws.org/Download_PDFS/WHB-1.9PV.pdf [Consultado: 19 Jul 2024]
- [5] H. Zhang y J. Senkara, Resistance Welding: Fundamentals and applications, Florida: CRC Press by Taylor&Francis Group, 2011.
- [6] M. Pouranvari y S. P. H. Marashi, «Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties,» *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 18, n° 5, pp. 361-403, 2013. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000120>
- [7] M. Jou, «Real time monitoring weld quality of resistance spot welding for the fabrication of sheet metal assemblies,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 132, n° 1-3, pp. 102-113, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00409-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00409-0)
- [8] Nissan, *Weld Master Trainer*, Aguascalientes: Interno, 2016.
- [9] K. Zhao y P. Yao, «Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 124, n° 1, pp. 170-198, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.01.041>
- [10] Nissan, *Inspección y control de calidad, en la aplicación de soldadura de elementos estructurales.*, Aguascalientes: Interno, 2009.
- [11] J. L. Calderón Cáceres y G. C. Scarpati Gálvez, «Los ensayos no destructivos (END) y su aplicación en la industria,» *Campus*, vol. 25, n° 10, pp. 59-66, 2018. <https://doi.org/10.24265/campus.2018.v23n25.05>
- [12] R. Ospina Lopez, C. Hernando Trujillo y H. Parra L., «Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones.,» *Scientia et Technica*, vol. 2, n° 4, pp. 196-201, 2011. [En línea] <https://www.redalyc.org/pdf/849/84922622035.pdf> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [13] Nissan, *Weld master trainer*, Aguascalientes: Interno, 2016.
- [14] D. Ulbrich, Z. Struminski y J. Kowalczyk, «Evaluation of spot welding joints by ultrasonic method,» *Welding Technology Review*, vol. 90, pp. 22-24, 2018. <https://doi.org/10.26628/wtr.v90i12.985>
- [15] S. R. Rincon Urbina, D. A. Calvo Cobos y E. J. Estrada Villa, «Técnica de partículas magnéticas: caso del laboratorio del CAMAN,» *Ciencia y poder aéreo*, vol. 10, n° 1, pp. 59-70, 2015. [En línea] <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=673571173007> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [16] L. Janousek, K. Capova, N. Yusa y K. Miya, «Multiprobe Inspection for Enhancing Sizing Ability in Eddy Current Nondestructive Testing,» *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, n° 6, pp. 1618-1621, 2008. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2008.916547>
- [17] N. Yusa, E. Machida, L. Janousek, Rebican, Mihai, Z. Chen y K. Miya, «Application of eddy current inversion technique to the sizing of defects in Inconel welds with rough surfaces,» *Nuclear engineering and design*, vol. 235, n° 14, pp. 1469-1480, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.01.005>



- [18] E. Pérez-Zapico, A. Duffus.Scott, C. René-Gómez-Pérez y F. Santo-Castillo, «Observación y cuantificación de defectos en soldaduras a través del procesamiento digital de imágenes termográficas.» *Ingeniería Mecánica*, vol. 16, n° 3, pp. 246-256, 2013. [En línea]
<https://www.redalyc.org/pdf/2251/225129326009.pdf> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [19] S. Keshav y R. David, «How to Read a Paper,» *Cheriton School of Computer Science*, pp. 1-2, 2016. [En línea]
<https://web.stanford.edu/class/cs114/reading-keshav.pdf> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [20] M. J Page et al., «The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews.» *BMJ*, vol. 71, pp. 372-383, 2021.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [21] Ó. Martín, M. López y F. Martín, «Artificial neural networks for quality control by ultrasonic testing in resistance spot welding,» *Materials processing technology*, vol. 183, n° 2-3, pp. 226-233, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.011>
- [22] Ó. Martín, M. S. I. Pereda y J. M. Galán, «Assessment of resistance spot welding quality based on ultrasonic testing and tree-based techniques,» *Materials processing technology*, vol. 214, n° 11, pp. 2478-2487, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.021>
- [23] J. Liu, G. Xu, L. Ren, Z. Qian y L. Ren, «Defect intelligent identification in resistance spot welding ultrasonic detection based on wavelet packet and neural network,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, n° 5-8, pp. 2581-2588, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9588-y>
- [24] L. Hua, B. Wang, X. Wang, X. He y S. Guan, «In-situ ultrasonic detection of resistance spot welding quality using embedded probe,» *Materials processing technology*, vol. 267, pp. 205-2014, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.008>
- [25] N. Amiri, G. Farrahi, K. Reza Kashyzadeh y M. Chizari, «Applications of ultrasonic testing and machine learning methods to predict the static & fatigue behavior of spot-welded joints,» *Manufacturing processes*, vol. 52, pp. 26-34, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.047>
- [26] C. Ji, J. K. Na, Y.-S. Lee, Y.-D. Park y M. Kimchi, «Robot-assisted non-destructive testing of automotive resistance spot welds,» *Welding in the World*, vol. 65, n° 1, pp. 119-126, 2020.
<https://doi.org/10.1007/s40194-020-01002-1>
- [27] D. Ulbrich y M. Kanczurzewska, «Correlation Tests of Ultrasonic Wave and Mechanical Parameters of Spot-Welded Joints,» *Materials*, vol. 15, n° 5, pp. 1-21, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15051701>
- [28] D. Ulbrich, G. Psuj, A. Wypych, Bartkowski, A. Bartkowska, A. Stachowiak y J. Kowalczyk, «Inspection of Spot Welded Joints with the Use of the Ultrasonic Surface Wave,» *Materials*, vol. 16, n° 21, pp. 1-16, 2023.
<https://doi.org/10.3390/ma16217029>
- [29] K. Tsukada, M. Yoshioka, T. Kiwa y Y. Hirano, «A magnetic flux leakage method using a magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation of spot welds,» *NDT & E International*, vol. 44, n° 1, pp. 101-105, 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.09.012>
- [30] K. Tsukada, K. Miyake, D. Harada, K. Sakai y T. Kiwa, «Magnetic Nondestructive Test for Resistance Spot Welds Using Magnetic Flux Penetration and Eddy Current Methods,» *Nondestructive evaluation*, vol. 32, pp. 286-293, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10921-013-0181-0>
- [31] G. Vértesy y I. Tomás, «Nondestructive magnetic inspection of spot welding,» *NDT & E International*, vol. 98, pp. 95-100, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.05.001>
- [32] N. Ma, X. Gao, M. Tian, C. Wang, Y. Zhang y P. P.Gao, «Magneto-Optical Imaging of Arbitrarily Distributed Defects in Welds under Combined Magnetic Field,» *Metals*, vol. 12, n° 6, pp. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.3390/met12061055>
- [33] J. Ruisz, J. Biber y M. Loipetsberger, «Quality evaluation in resistance spot welding by analysing the weld fingerprint on metal bands by computer vision,» *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 33, n° 5-6, pp. 952-960, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0522-6>
- [34] H. Zhang, F. Wang, T. Xi, J. Zhao, L. Wang y W. Gao, «A novel quality evaluation method for resistance spot welding based on the electrode displacement signal and the Chernoff faces technique,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 62, pp. 431-443, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.03.007>
- [35] C. Deniz y M. Cakir, «In-line stereo-camera assisted robotic spot welding quality control system,» *Industrial Robot*, vol. 45, n° 1, pp. 54-63, 2018.
<https://doi.org/10.1108/IR-06-2017-0117>



- [36] Y.-J. Xia, Z.-W. Su, Y.-B. Li, L. Zhou y Y. Shen, «Online quantitative evaluation of expulsion in resistance spot welding,» *Manufacturing processes*, vol. 46, pp. 34-43, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.004>
- [37] W. Dai, D. Li, D. Tang, Q. Jiang, D. Wang, H. Wang y Y. Peng, «Deep learning assisted vision inspection of resistance spot welds,» *Manufacturing processes*, vol. 62, pp. 262-274, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.015>
- [38] E. Alghannam, H. Lu, M. Ma, Q. Cheng, A. A. Gonzalez, Y. Zang y S. Li, «A Novel Method of Using Vision System and Fuzzy Logic for Quality Estimation of Resistance Spot Welding,» *Symmetry*, vol. 11, n° 8, pp. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.3390/sym11080990>
- [39] Y. Li, G. Tang, Y. Ma, S. Liu y T. Ren, «An electrode misalignment inspection system based on image processing technology for use in resistance spot welding,» *Measurement Science and Technology*, vol. 30, n° 7, pp. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab1245>
- [40] T. Zheng, Y. Yang, P. Zheng, L. Benz y L. Wang, «An Appearance Inspection Method for Resistance Spot Welding Based on Semantic Segmentation,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 790, pp. 27-29, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/790/1/012088>
- [41] T. Cannabrava, U. Ibusuki y E. G. Del Conte, «Development of a digital twin for spot welding quality inspection in an industry 4.0 testbed of a Brazilian University,» *SSRN*, pp. 1-6, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4075189>
- [42] L. Forejtová, T. Zavadil, L. Kolařík, M. Kolaříková, J. Sova y P. Vávra, «Non-Destructive inspection by infrared thermography of resistance spot welds used un automotive industry,» *Acta Polytechnica*, vol. 59, n° 3, pp. 238-247, 2019. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0238>
- [43] L. Santoro, V. Razza y M. De Maddis, «Frequency-based analysis of active laser thermography for spot weld quality assessment,» *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, pp. 3017-3029, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12845-5>
- [44] M. Pereda, J. Santos, Ó. Martín y J. Galán, «Direct quality prediction in resistance spot welding process: Sensitivity, specificity and predictive accuracy comparative analysis,» *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 20, n° 8, pp. 679-685, 2015. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000052>
- [45] H. Pashazadeh, Y. Gheisari y M. Hamed, «Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm,» *Intelligent Manufacturing*, vol. 27, n° 2, pp. 549-559, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0891-x>
- [46] I. Boersch, U. Füssel, C. Gresch, C. Großmann y B. Hoffmann, «Data mining in resistance spot welding,» *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, n° 9-12, pp. 1085-1099, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9847-y>
- [47] B. Zhou, T. Pychynski, M. Reischl, E. Kharlamov y R. Mikut, «Machine learning with domain knowledge for predictive quality monitoring in resistance spot welding,» *Intelligent Manufacturing*, vol. 33, n° 2, pp. 1139-1163, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01892-y>
- [48] J. Hu, J. Bi, H. Liu, Y. Li, S. Ao y Z. Luo, «Prediction of Resistance Spot Welding Quality Based on BPNN Optimized by Improved Sparrow Search Algorithm,» *Materials*, vol. 15, n° 20, pp. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15207323>
- [49] J. Shao, S. Wang, B. Yang, Z. Zhang y Y. Wang, «A Hybrid Algorithm Based on GRNN and Grasshopper Optimization Algorithm for Welding Nugget Diameter Prediction,» *Computing and information science in engineering*, vol. 23, n° 3, pp. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1115/1.4054832>
- [50] K. Zhou y L. Cai, «Online nugget diameter control system for resistance spot welding,» *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 68, n° 1-4, pp. 2571-2588, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4886-0>
- [51] H. Zhang, Y. Hou, J. Zhang, X. Qi y F. Wang, «A new method for nondestructive quality evaluation of the resistance spot welding based on the radar chart method and the decision tree classifier,» *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 78, n° 1-4, pp. 841-851, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6654-1>
- [52] B. Xing, Y. Xiao, Q. H. Qin y H. Cui, «Quality assessment of resistance spot welding process based on dynamic resistance signal and random forest based,» *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, n° 1-4, pp. 327-339, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0889-6>
- [53] W. Dai, D. Li, Y. Zheng, D. Wang, D. Tang, H. Wang y Y. Peng, «Online quality inspection of resistance spot welding for automotive production lines,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 63,



- pp. 354-369, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.008>
- [54] J. Wen y H. Jia, «Real-time monitoring system for resistance spot welding quality,» *Engineering Research Express*, vol. 5, n° 1, pp. 1-9, 2023.
<https://doi.org/10.1088/2631-8695/acb130>
- [55] Z. Xiaoyun, Z. Yansong y C. Guanlong, «Weld quality inspection based on on-line measured indentation from servo encoder in resistance spot welding,» de *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Sorrento, Italy, 2006.
<https://doi.org/10.1109/IMTC.2006.328560>
- [56] D. Younes, E. Alghannam, Y. Tan y H. Lu, «Enhancement in Quality Estimation of Resistance Spot Welding Using Vision System and Fuzzy Support Vector Machine,» *Symmetry*, vol. 12, n° 8, pp. 1-19, 2020.
<https://doi.org/10.3390/sym12081380>
- [57] B. Wang, «A study on spot welding quality judgment based on hidden Markov model,» *Process Mechanical Engineering*, vol. 235, n° 2, pp. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1177/0954408920953952>
- [58] Y. Liu, Y. Pan, H. Chen, W. Wang, T. An y X. Chen, «Research on quality inspection model of spot welding of equalthickness three-layer sheets based on ultrasonic A-scan,» *Physics: Conference Series*, vol. 2246, n° 012083, pp. 1-8, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2246/1/012083>
- [59] O. Martín, V. Ahedo, J. I. Santos y J. M. Galán, «Comparative Study of Classification Algorithms for Quality Assessment of Resistance Spot Welding Joints From Pre- and Post-Welding Inputs,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 6518-6527, 12 January 2022.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142515>
- [60] V. H. Pham, H. T. Vo, D. D. Vu, J. Choi, S. Park, D. T. Nguyen, B.-I. Lee y J. Oh, «Development of Scanning Acoustic Microscopy System for Evaluating the Resistance Spot Welding Quality,» *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 33, n° 3, pp. 123-137, 2022.
<https://doi.org/10.1080/09349847.2022.2073415>
- [61] M. Acebes, I. Gauna León, H. de Matías Jiménez, R. Delgado de Molina y A. Álvarez de Pablos, «Ultrasonic Spot Weld inspection system based on Industrial Robotic, Artificial Intelligence and Artificial Vision,» *Nondestructive Testing*, vol. 28, n° 8, pp. 1-6, 2023. [En línea]
<https://www.tecnitestndt.net/wp-content/uploads/2023/06/ECNDT-23-Spot-Weld.pdf> [Consultado: 19 Jul 2024]
- [62] Y. Zhou, C. Pan, J. Chen, Y. Gan y X. Gao, «Online evaluation method of resistance spot welding quality based on locally linear embedding algorithm,» *Physics: Conference Series*, vol. 2658, n° 012049, pp. 1-6, 2023.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2658/1/012049>
- [63] C. Summerville, D. Adams, P. Compston y D. Matthew, «Nugget diameter in resistance spot welding: a comparison between a dynamic resistance based approach and ultrasound C-scan,» *Procedia Engineering*, vol. 183, pp. 257-263, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.033>

Derechos de Autor (c) 2024 Jazmin Monserrat Rodriguez Torres, Carolina Reta, Francisco Javier Ibarra Villegas



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)