

Análisis del potencial de aplicación del robot colaborativo FANUC CRX-25iA en procesos de soldadura del taller de alta ingeniería de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC)

Luis Felipe Henao Vanegas

Director del curso

José Camilo Eraso Guerrero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías e Ingeniería ECBTI

Tecnología en Automatización Industrial

2026

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado, en primer lugar, a Dios, a la Santísima Virgen y San José, por brindarme la fortaleza, sabiduría y la perseverancia necesaria para culminar esta importante etapa de mi vida académica. De manera especial a mis hijos, hermanas, a mi amada esposa y a mi madre que fueron la gran fuente de inspiración y motivación para poder brindarles esta alegría de verme salir adelante, a todas ellas, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante, quienes han sido el pilar fundamental en cada uno de mis logros. Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra forma, aportaron su apoyo, confianza y motivación para hacer posible la realización de este proyecto.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, a la Virgen Santísima y a San José por darme la fortaleza, la salud y constancia necesaria para alcanzar este gran logro académico. De manera especial, agradezco a mis docentes y asesores, quienes con su orientación, conocimientos y disposición contribuyeron significativamente al desarrollo y culminación de este proyecto de grado. Así mismo, agradezco a la institución y a todas las personas que, directa o indirectamente brindaron su apoyo y colaboración, haciendo posible la realización de este trabajo.

Resumen

La implementación de celdas colaborativas en procesos de soldadura mediante el robot FANUC CRX-25iA representa una solución innovadora para optimizar la manufactura flexible en entornos industriales. Este tipo de robot colaborativo permite una interacción segura entre humanos y máquinas, mejorando la eficiencia, la calidad del producto y la adaptabilidad de los procesos. Gracias a su diseño ergonómico, facilidad de programación y capacidad de integración con sistemas de visión y sensores, el CRX-25iA facilita la automatización de tareas repetitivas y de precisión, reduciendo tiempos de ciclo y costos operativos. Esta monografía analiza los beneficios técnicos, económicos y operativos de su implementación, así como los desafíos y consideraciones clave para su integración exitosa en líneas de producción modernas.

Palabras claves: Cobot, Soldadura Industrial, Automatización Colaborativa.

Abstract

The implementations of collaborative cells in welding processes using the FANUC CRX-25iA robot represent an innovative solution to optimize flexible manufacturing in industrial environments. This type of collaborative robot allows for safe interaction between humans and machines, enhancing efficiency, product quality, and process adaptability. Thanks to its ergonomic design, ease of programming, and ability to integrate with vision systems and sensors, the CRX-25iA facilitates the automation of repetitive and precision tasks, reducing cycle times and operational costs. This monograph analyzes the technical, economic, and operational benefits of its implementation, as well as the challenges and key considerations for its successful integration into modern production lines.

Keywords: Cobot, Industrial Welding, Collaborative Automation.

Tabla de Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	14
Justificación	16
Objetivos	18
Objetivo General	18
Objetivos Específicos.....	18
Marco Teórico.....	19
Automatización Industrial.....	19
Manufactura Flexible	20
Robótica Industrial	21
Aplicaciones de la Robótica Industrial.....	26
Diferencias con el Robot Tradicional.....	28
Diferencia Entre Sensor de Torque y Fuerza	29
Robótica Soldadura	30
Fundamentos de la Soldadura.....	30
Procesos MIG y TIG	38
Control de Velocidad.....	42
Estrategias de Control	45
Sistemas de Seguimiento de Junta.....	47
Soldadura de Reparación.....	48
Cuadro Comparativo Desgaste Irregular	52
Metodología	54

Enfoque y Diseño Metodológico	54
Fases Metodológicas	55
Fase 1 Revisión de Literatura Científica Sobre Robótica Colaborativa Aplicada a Procesos de Soldadura y Mantenimiento Industrial	55
Aplicaciones en Procesos de Soldadura	62
Fase 2 Caracterización Técnica del FANUC CRX-25iA y del Entorno de Aplicación CHEC	72
Capacidades Técnicas del Taller	77
Fase 3 Relación Capacidad–Tarea y Determinación de Escenarios de Aplicación	90
Evaluación y Viabilidad	92
Técnicas de Análisis.....	94
Limitaciones del Estudio.....	95
Resultados	97
Robótica Colaborativa (COBOTS).....	97
Aplicaciones de Cobots en Procesos de Soldadura Industrial	98
Aplicaciones Específicas de Cobot en Soldadura Industrial en CHEC.....	103
Eficiencia, Seguridad y Ergonomía Laboral	104
Soldadura de Recuperación de Rodetes	108
Soldadura de Ejes Estructurales Medianos	109
Comparación de procesos.....	109
Viabilidad de la Soldadura en Procesos Aplicables	110
Limitaciones en Geometrías Complejas.....	110
Viabilidad de Reparaciones Menores.....	111
Limitaciones Técnicas Identificadas	112

Discusión.....	114
Conclusiones.....	119
Bibliografía.....	120

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Aplicación de la Robótica Industrial</i>	26
Tabla 2 <i>Diferencias del Cobot y el Robot Tradicional</i>	28
Tabla 3 <i>Propiedades e Influencias de la Soldadura</i>	34
Tabla 4 <i>Efecto Térmico y Consecuencias en la Soldadura</i>	36
Tabla 5 <i>Aspectos MIG/TIG</i>	39
Tabla 6 <i>Proceso, Aplicaciones y Características Claves de la Soldadura MIG / TIG</i>	40
Tabla 7 <i>Cuadro Comparativo de Ventajas y Desventajas de MIG y TIG</i>	40
Tabla 8 <i>Velocidad, Efectos y Riesgos en el Cordón de la Soldadura</i>	42
Tabla 9 <i>Estrategia, Aplicación y Beneficios de la Soldadura</i>	45
Tabla 10 <i>Cuadro Comparativo de Desgaste Irregular</i>	52
Tabla 11 <i>Características y Especificaciones del Robot FANUC CRX-25iA</i>	74
Tabla 12 <i>Infraestructura de Generación Atendida por CHEC</i>	77
Tabla 13 <i>Capacidades Técnicas Instaladas</i>	78
Tabla 14 <i>Descripción de las Variables Técnicas en CHEC</i>	82
Tabla 15 <i>Aspectos, Requisitos y Evaluaciones del Robot CRX-25iA</i>	88
Tabla 16 <i>Relación Directa Tarea-Capacidad del Robot Colaborativo</i>	91
Tabla 17 <i>Eficiencia, Seguridad y Ergonomía del Robot CRX25-iA</i>	105
Tabla 18 <i>Dimensión, Aplicación y Limitaciones en CHEC</i>	107
Tabla 19 <i>Proceso, Ventajas y Limitaciones de la Soldadura</i>	109

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Robótica Industrial</i>	21
Figura 2 <i>Robot Colaborativo</i>	22
Figura 3 <i>Conexiones Seriales</i>	23
Figura 4 <i>Sistema Robótico Inteligente</i>	23
Figura 5 <i>Cobot Ligero</i>	24
Figura 6 <i>Mecanizado CNC</i>	25
Figura 7 <i>Robot Scara</i>	25
Figura 8 <i>Brazo Robótico</i>	26
Figura 9 <i>Robot Colaborativo</i>	28
Figura 10 <i>Soldaduras</i>	31
Figura 11 <i>Defectos de Soldaduras</i>	32
Figura 12 <i>Zonas Afectadas por el Calor</i>	33
Figura 13 <i>Daños e Incidentes Provocados por la Soldadura</i>	35
Figura 14 <i>Máquinas de Soldadura Laser</i>	37
Figura 15 <i>Soldadura MIG</i>	39
Figura 16 <i>Procesos de Soldadura Automatizado</i>	42
Figura 17 <i>Soldadura de Superficie Metálica</i>	43
Figura 18 <i>Soldaduras</i>	44
Figura 19 <i>Exactitud y Repetibilidad.</i>	46
Figura 20 <i>Robótica Industrial</i>	48
Figura 21 <i>Discontinuidades de Soldaduras</i>	49
Figura 22 <i>Defectos de Soldaduras</i>	51

Figura 23 <i>Cobots</i>	56
Figura 24 <i>Interacción Humano - Robot</i>	57
Figura 25 <i>Estadísticas del Uso del Cobot</i>	60
Figura 26 <i>Soldadura</i>	64
Figura 27 <i>Soldadura TIG Colaborativa</i>	65
Figura 28 <i>Soldadura Industrial</i>	66
Figura 29 <i>Soldadura Láser</i>	67
Figura 30 <i>Cobot</i>	72
Figura 31 <i>Cobot Colaborativo</i>	76
Figura 32 <i>Taller Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	80
Figura 33 <i>Unidad Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	82
Figura 34 <i>Centro Mecanizado CHEC 2026</i>	83
Figura 35 <i>Servicios y Capacidades Técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026</i>	83
Figura 36 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	84
Figura 37 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	84
Figura 38 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	86
Figura 39 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	87
Figura 40 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	88
Figura 41 <i>Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026</i>	90
Figura 42 <i>Quemaduras de Soldaduras</i>	97
Figura 43 <i>Diagrama de Flujo del Proceso de Soldadura con cobot en CHEC</i>	100
Figura 44 <i>Crecimiento Global de la Robótica Industrial</i>	114

Introducción

En los últimos años; La industria manufacturera ha experimentado una rápida transformación impulsada por la convergencia de la automatización, la inteligencia artificial y la digitalización de los procesos productivos. Este fenómeno, denominado Industria 4.0, ha permitido el desarrollo de sistemas de fabricación que son inteligentes, están interconectados y capaces de adaptarse a las demandas cambiantes del mercado (Lee et al., 2018). En este contexto, la robótica colaborativa se presenta como una herramienta clave que posibilita la interacción eficiente y segura entre humanos y máquinas, mejorando a la vez la calidad, la seguridad y la productividad en el entorno laboral (Romero & Stahre, 2021; Arents et al., 2021).

Según la Federación Internacional de Robótica (IFR, 2023), señala que la implementación de robots colaborativos ha crecido más del 17% anual, específicamente en entornos de manufactura pequeña y mediana donde la flexibilidad y la interacción humana son esenciales. Este crecimiento evidencia que la robótica colaborativa se ha consolidado como un componente estratégico dentro de los sistemas de producción a nivel mundial.

Por otra parte, la soldadura industrial continúa siendo una de las actividades con mayor nivel de riesgo, ya que los trabajadores se enfrentan a posturas ergonómicamente desfavorables, radiación UV, humos metálicos y temperaturas elevadas (Guha et al., 2017; Chandra & Arora, 2024; Sheikhi et al., 2025). Aunque la soldadura manual depende en gran medida de la experiencia del operario, presenta variaciones en la calidad del cordón y supone una carga física considerable (Cao et al., 2024). En este sentido, la soldadura colaborativa surge como una alternativa que combina la precisión del robot con la supervisión humana, permitiendo mejorar la productividad y reducir los riesgos laborales (Ferreira, 2023).

En el contexto del sector energético, los procesos de mantenimiento industrial requieren

altos estándares de precisión y confiabilidad, particularmente en la reparación de componentes críticos como turbinas, álabes y estructuras metálicas sometidas a esfuerzos mecánicos constantes. En estos escenarios, la automatización debe analizarse no solo desde la perspectiva de productividad, sino también desde su viabilidad técnica y compatibilidad con tareas de geometría variable y alta exigencia estructural.

En particular, la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) cuenta con un Taller de Alta Ingeniería encargado del mantenimiento y recuperación de componentes metálicos críticos para la generación de energía, tales como turbinas, álabes y estructuras de soporte. Como parte de sus procesos de modernización tecnológica, el taller dispone de un robot colaborativo FANUC CRX-25iA, cuya incorporación abre la posibilidad de explorar alternativas de automatización en actividades de soldadura de mantenimiento.

En este sentido, el presente trabajo se orienta a identificar las aplicaciones potenciales y las limitaciones técnicas del robot colaborativo FANUC CRX-25iA en procesos de soldadura de mantenimiento industrial, a partir de una revisión de literatura y un análisis contextual del Taller de Alta Ingeniería de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC).

Planteamiento del Problema

La central hidroeléctrica de caldas (CHEC) cuenta con un taller de alta ingeniería donde se realizan los procesos de mantenimiento y la reparación de componentes metálicos esenciales para la generación de energía, como turbinas, álabes, ejes estructuras de soporte. En estas actividades, la soldadura desempeña un papel estratégico, ya que muchas piezas requieren recuperación estructural para garantizar su operación segura y confiable. La organización, con una planta aproximada de 1.129 trabajadores a 2024, mantiene una estructura técnica consolidada orientada a la confiabilidad del servicio, la modernización tecnológica de sus activos y el fortalecimiento de la seguridad y eficiencia operativa (CHEC, 2024a; CHEC, 2024b). En este contexto, el taller de alta ingeniería cumple un rol fundamental en el mantenimiento de componentes críticos, alineándose con los objetivos institucionales de calidad, continuidad del servicio y transformación tecnológica.

Actualmente, gran parte de los procesos de soldadura en CHEC se realizan de manera manual específicamente mediante técnicas TIG (Tungsten Inert Gas) y MIG (Metal Inert Gas). Lo que implica una dependencia significativa de la experiencia y habilidad del operario. Aunque el personal cuenta con amplia trayectoria y conocimientos técnicos, la soldadura manual presenta limitaciones importantes. La calidad del cordón puede variar debido a factores como la fatiga, la postura o condiciones del entorno, lo que compromete la uniformidad y repetitividad del proceso. Además, los trabajadores están expuestos de forma constante a radiación, humos metálicos y altas temperaturas, lo que puede generar afectaciones en la salud a mediano y largo plazo. Las posturas forzadas y los movimientos repetitivos incrementan el riesgo de lesiones musculoesqueléticas, mientras que los tiempos prolongados de ejecución en piezas de gran tamaño o geometría compleja aumentan el desgaste físico y la posibilidad de retrabajos,

dificultando mantener estándares de precisión y productividad estables. (Guha et al., 2017; Riccelli et al., 2020, Gualtieri et al., 2021).

En contraste, la industria 4.0 ha impulsado soluciones avanzadas de automatización que permiten un control más exacto de los parámetros del proceso, mayor trazabilidad digital y repetitividad superior frente a la soldadura manual (Lu, 2017a; Zheng et al., 2018). Entre estas innovaciones se destacan los robots colaborativos, diseñados para interactuar de forma segura con los operadores humanos mediante sensores de fuerza, limitación de potencia y programación flexible (Sarivan et al., 2024; Cao et al., 2024).

Dentro de este panorama, el Taller de Alta Ingeniería dispone actualmente de un robot colaborativo FANUC CRX-25iA, adquirido como parte de los procesos de modernización tecnológica. Este equipo cuenta con capacidades orientadas a la automatización de tareas repetitivas y físicamente demandantes, lo que en principio podría resultar pertinente para actividades de soldadura de mantenimiento en componentes estructurales como turbinas y álabes (Villani et al., 2018; Grigore et al., 2011). Sin embargo, la sola disponibilidad del equipo no garantiza su aprovechamiento técnico, ya que no se ha realizado un análisis sistemático que permita determinar en qué tareas específicas puede aplicarse de manera efectiva, ni cuáles serían sus alcances y limitaciones dentro del entorno particular del taller.

En contexto, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué aplicaciones potenciales y qué limitaciones técnicas presenta el robot colaborativo FANUC CRX-25iA para su uso en procesos de soldadura de mantenimiento en el Taller de Alta Ingeniería de la CHEC?

Justificación

El uso de tecnologías de automatización colaborativa de procesos industriales ha crecido de manera significativa en los últimos años, especialmente en tareas que requieren precisión, repetitividad, y control de parámetros, como la soldadura. En este contexto, resulta pertinente analizar la posible aplicación de un robot colaborativo en el taller de alta ingeniería de la central hidroeléctrica de caldas CHEC, dado que este espacio interviene componentes metálicos y turbinas con geometrías complejas y condiciones particulares de reparación (Keshvarparast et al., 2023; Othman & Yang, 2023).

Desde el punto de vista técnico, el estudio permite evaluar como la robótica colaborativa puede integrarse en actividades de soldadura, identificando alcances, requerimientos y beneficios potenciales. La incorporación de un cobot como el FANUC CRX-25iA teóricamente podría contribuir a disminuir la variabilidad del proceso, optimizar la precisión en trayectorias de soldadura y reducir la carga física del operador en tareas repetitivas o de alta exigencia ergonómica. (Pac, Zhang, & Li, 2021).

A nivel organizacional, la investigación aporta criterios para la modernización tecnológica del taller, alineándose con los principios de la industria 4.0. La evaluación técnica de su aplicación permitiría establecer criterios para impactar en la calidad y los tiempos del ciclo, así como también promover un entorno laboral más seguro y sostenible, disminuyendo riesgos físicos y fomentando una cultura de innovación (Commission et al., 2021). En una empresa del sector energético, donde la continuidad del servicio es estratégica, la optimización de procesos de mantenimiento mediante soluciones avanzadas puede incrementar la fiabilidad operacional y el uso eficiente de recursos técnicos y humanos (Ghobakhloo., 2020).

Desde el punto de vista académico, el estudio contribuye al análisis de la robótica

colaborativa en entornos de mantenimiento industrial pesado, un contexto que presenta mayores niveles de variabilidad geométrica y exigencia estructural en comparación con los procesos de manufactura seriada comúnmente abordados en la literatura. La identificación de aplicaciones potenciales y limitaciones técnicas del robot en este escenario aporta elementos de discusión sobre la viabilidad de los cobots en tareas de reparación y recuperación estructural.

En el ámbito profesional, el desarrollo de esta investigación fortalece competencias en automatización industrial, análisis técnico de sistemas robotizados y evaluación de tecnologías emergentes aplicadas a procesos reales. Asimismo, promueve una visión crítica frente a la incorporación de tecnologías 4.0, priorizando el análisis técnico riguroso antes de su implementación operativa.

Objetivos

Objetivo General

Determinar las aplicaciones potenciales y las limitaciones técnicas del robot colaborativo FANUC CRX-25iA para su uso en procesos de soldadura de mantenimiento en el Taller de Alta Ingeniería de la CHEC.

Objetivos Específicos

Revisar la literatura científica sobre robótica colaborativa aplicada a procesos de soldadura y mantenimiento industrial.

Caracterizar las capacidades técnicas del robot FANUC CRX-25iA y las condiciones operativas de las tareas de soldadura del Taller de Alta Ingeniería.

Relacionar las capacidades del robot con las tareas de soldadura del taller para establecer escenarios potenciales de aplicación y restricciones técnicas.

Marco Teórico

Automatización Industrial

La automatización industrial se entiende como la incorporación de tecnologías digitales, sistemas de control y dispositivos programables en los procesos productivos, con el fin de optimizar la seguridad, calidad y eficiencia. Su evolución ha pasado de la mecanización de tareas repetitivas hacia la integración de redes industriales, sensores, actuadores y sistemas ciberfísicos, que permiten la supervisión y el perfeccionamiento en tiempo real.

En términos conceptuales, la automatización puede clasificarse en:

Fijas, Orientadas a tareas repetitivas y constantes.

Programable, que admite modificaciones en función de cambios en diseño o volumen de producción.

Flexible, capaz de adaptarse rápidamente a nuevas especificaciones.

Con el avance hacia la industria 4.0, la automatización se transforma en sistemas inteligentes que recopilan datos, los analizan y ajustan parámetros operativos mediante algoritmos de optimización y aprendizaje automático.

Desde una perspectiva técnica, la automatización abarca distintos niveles:

Mecánica, basada en máquinas que ejecutan operaciones repetitivas.

Eléctrica y electrónica, con sensores, actuadores y controles básicos.

Programable, mediante PLC, CNC, robots industriales y software especializado.

Inteligente, vinculada a la IA, análisis de datos y conectividad para optimizar procesos en tiempo real.

En la práctica, esta evolución ha permitido que sectores como la manufactura, la energía y la metalmecánica mejoren la eficiencia, precisión y la repetitividad, reduciendo la variabilidad

del trabajo manual y favoreciendo la estabilidad de los procesos. Además de incrementar la productividad, la automatización contribuye a mejorar las condiciones laborales al asumir tareas repetitivas, pesadas o riesgosas, redistribuyendo el rol humano hacia actividades de supervisión, gestión y toma de decisiones.

En síntesis, la automatización industrial ha pasado de ser un mecanismo de mecanización básica a convertirse en un pilar estratégico de la competitividad y la modernización tecnológica, integrando inteligencia artificial, conectividad y flexibilidad para responder a los desafíos de la industria contemporánea. (Sharma, P., Singh, R., & Gupta, A. (2024).

Manufactura Flexible

La manufactura flexible es un modelo de producción basado en sistemas modulares y reconfigurables que permiten adaptarse con rapidez a cambios en el producto, el volumen a las condiciones del proceso, manteniendo la calidad y la eficiencia. Este enfoque se potencia con la incorporación de robots colaborativos (cobots). (Koren et al., 2018).

Dichos dispositivos aportan a la manufactura flexible con las siguientes capacidades:

Versatilidad de máquina: puede ejecutar múltiples tareas de soldadura, manipulación y ensamble con mínimos ajustes, gracias a su programación intuitiva y facilidad de integración con sistemas CNC y celdas modulares (FANUC, 2024).

Colaboración segura: Diseñado para trabajar junto a operarios sin necesidad de barreras físicas, lo que facilita la adaptación en talleres de mantenimiento industrial con alta variabilidad de piezas (RobotWorx, 2024).

Reconfiguración rápida: Su interfaz de programación simplificada y la posibilidad de cambiar herramientas reducen tiempos muertos y permiten responder a series cortas o productos personalizados (FANUC, 2024).

Integración digital: Se conecta con sensores inteligentes, software de simulación y gemelos digitales, alineándose con los principios de la industria 4.0 para realizar ajustes dinámicos en el proceso (Zhong, Xu, Klotz & Newman, 2017).

Flexibilidad de volumen y producto: Permite escalar la producción o introducir variantes de diseño sin comprometer la precisión técnica ni la consistencia de los resultados (Koren, Gu & Guo, 2018).

En este contexto, el rol del operario evoluciona hacia funciones de supervisión, programación y precisión. Así, la manufactura flexible equilibra productividad y personalización, posibilitando la transición de la producción masiva rígida hacia modelos dinámicos, adaptativos y centrados en la variabilidad de la demanda.

Robótica Industrial

Robótica industrial: Es la rama de la ingeniería que aplica robots en procesos productivos para automatizar tareas como soldadura, ensamble, pintura o manipulación de materiales.

Figura 1

Robótica Industrial



Nota. En la imagen se muestra una plataforma robótica móvil. Tomado de. Robótica industrial:

una visión general y explotación práctica. Sara Monta, Magola Morales, Sánchez Stalin, Diana García. (2024). <https://doi.org/10.61384/r.c.a.v4i3.47>

Carga útil: Peso máximo que el robot puede manipular en su extremo operativo incluyendo herramientas y piezas.

Figura 2

Robot Colaborativo

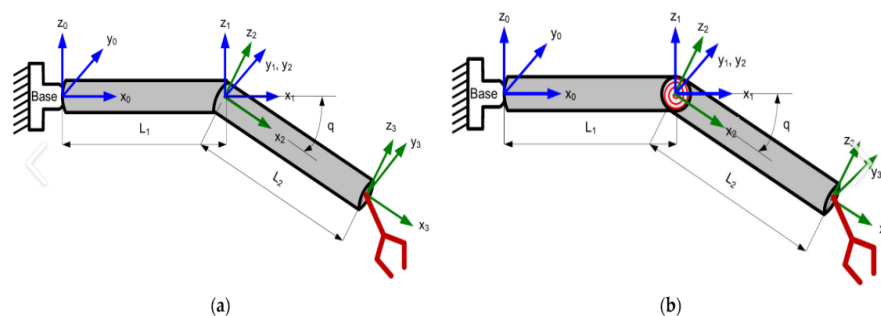


Nota. En la imagen se muestra un brazo robot que permite trasladar objetos de un lado a otro.

Tomado de Automatización inteligente. AbiolaVarela (2024),

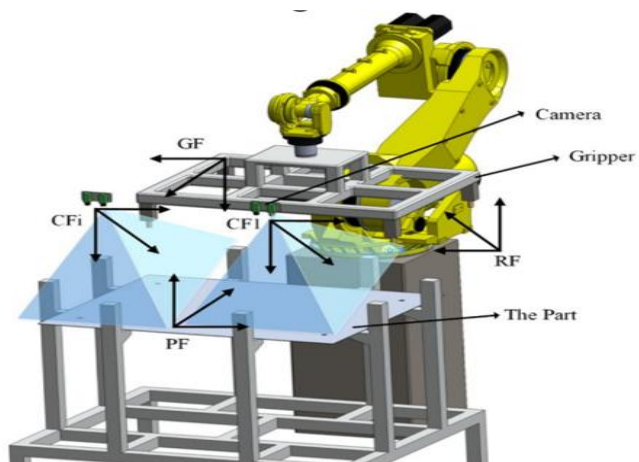
<https://mexicoindustry.com/noticia/automatizacion-inteligente-como-los-robots-y-cobots-están-transformando-la-industria>

Alcance: Distancia máxima que el cobot puede cubrir desde su base hasta el punto más lejano que alcanza su efector final.

Figura 3*Conexiones Seriales*

Nota. En la imagen se muestran dos tipos de conexiones seriales de dos enlaces (a) conexión rígida, (b) conexión elástica. Tomado de Review of Industrial Robot Stiffness Identification and Modelling. Wu, K., Li, J., Zhao, H., & Zhong, Y. (2022) <https://doi.org/10.3390/app12178719>.

Repetitividad del robot: Capacidad de volver a la misma posición con precisión después de ejecutar múltiples veces un movimiento.

Figura 4*Sistema Robótico Inteligente*

Nota. En la imagen se muestra un sistema robótico inteligente de agarre chasis robot (RF), el marco de piezas (PF), el marco de agarre del robot (GF) y el marco de cámara (CF). Tomado de:

Estimacion de poses bajada en multiples vistas y sus aplicaciones en la fabricacion inteligente.

Yang, H.; Jiang, P.; Wang. *Sensors* (2020). <https://doi.org/10.3390/s20185072>

Rigidez estructural: Grado de resistencia de la estructura del robot frente a deformaciones, vibraciones o fuerzas externas, lo que influye en su precisión y estabilidad.

Figura 5

Cobot Ligero



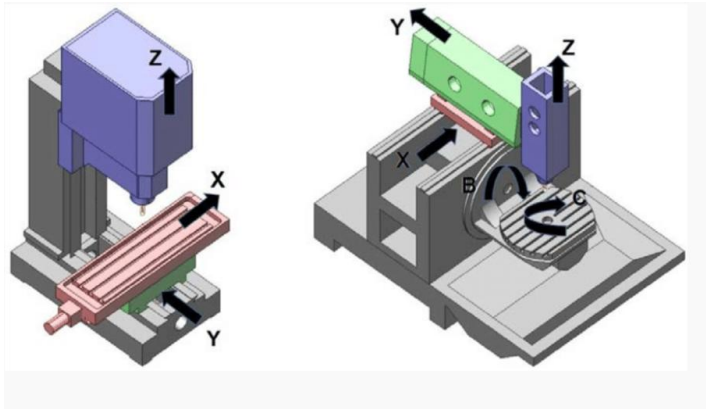
Nota. En la imagen se muestra un nuevo diseño de cobot. Tomado de El cobot ligero y de largo alcance llega más lejos en las máquinas. Caroline Del Guidice (2023).

<https://www.thefabricator.com/thefabricatoren espanol/product/automationrobotics/el-cobot-ligero-y-de-largo-alcance-llega-mas-lejos-en-las-maquinas>.

Robots cartesianos: se mueven en tres ejes lineales (X, Y, Z). Son precisos y se usan en aplicaciones de ensamble, CNC y manipulación de piezas.

Figura 6

Mecanizado CNC



Nota. En la imagen se muestra un CNC de 3 ejes y un CNC de 5 ejes. Tomado de Mecanizado CNC de 3 ejes vs. Mecanizado CNC de 5 ejes: ¿Cuál es mejor para su proyecto? D.Acharya (2023). <https://www.zintilon.com/es/blog/3-axis-vs-5-axis-cnc-machining/>

Scara: (Selective Compliance Assembly Robot Arm). Brazo robotizado de ensamble de cumplimiento selectivo. Es un Robots con movimiento en plano horizontal y cierta flexibilidad vertical. Ideales para ensamble rápido y manipulación ligera.

Figura 7

Robot Scara



Nota. En la imagen se muestra un Robot SCARA de alta precisión. Tomado de fabricante de robot SCARA. Robot Phoenix. (s.f.). SCARA robot <https://www.rrobotic.com/products/scara->

robot/

Antropomórficos (articulados): Son dispositivos robóticos diseñados para imitar la forma y los movimientos del cuerpo humano. También conocidos como robots poli articulados, tiene articulaciones que le permiten realizar tareas complejas que requieren precisión y adaptabilidad.

Figura 8

Brazo Robótico



Nota. En la imagen se muestra una representación de brazos robóticos. Tomado de Rende ring White Robotic Arm on White background, Depositphotos(s.f), <https://depositphotos.com/es/photo/rendering-white-robotic-arm-white-background->.

Aplicaciones: La robótica industrial tiene aplicaciones amplias y estratégicas en múltiples sectores.

Aplicaciones de la Robótica Industrial

Tabla 1

Aplicación de la Robótica Industrial

Área	Aplicación	Ejemplo
------	------------	---------

Manufactura	Automatización de líneas de producción.	Ensamble de automóviles, soldadura robotizada, Pintura de carrocerías.
Logística y almacenes	Manipulación de materiales y paletizado.	Clasificación de paquetes, carga y descarga, Transporte interno.
Electrónica	Ensamble de componentes delicados.	Montajes de placas PCB, soldadura de microcomponentes.
Alimentaria	Procesamiento y empaque	Corte, clasificación, empaquetado higiénico.
Farmacéutica	Dosificación y Manipulación estéril.	Llenado de viales, etiquetado, Inspección visual.
Inspección y control de calidad	Verificación automática.	Detección de defectos, medición dimensional, pruebas funcionales.
Soldadura	Precisión y repetitividad.	Soldadura MIG/TIG, automatizada, En estructuras metálicas.
Pintura y recubrimiento	Aplicación uniforme.	Pintura de piezas metálicas, Recubrimiento anticorrosivo.
Manipulación de materiales peligrosos	Seguridad operativa.	Manejo de químicos, residuos tóxicos, Ambientes extremos.

Nota. esta tabla nos muestra las diferentes aplicaciones de la robótica industrial.

Figura 9

Robot Colaborativo



Nota. En la imagen se muestra las funciones de los robots con inteligencia artificial. Tomado de Robots colaborativos con habilidades cognitivas. CADE Cobots (2019, junio12)

<https://cadecobots.com/cobots-robots-con-inteligencia-artificial/>

Diferencias con el Robot Tradicional

Tabla 2

Diferencias del Cobot y el Robot Tradicional

Tipo	Robot tradicional	Cobot
Seguridad	Requiere cercados, barreras y sistemas externos de protección.	Integran sensores y limitaciones de potencia para trabajar Cerca de humanos.
Potencia y velocidad	Alta velocidad, gran fuerza, manipulación de cargas pesadas.	Limitados en fuerza y velocidad para evitar riesgos.
Flexibilidad	Programación compleja, requiere especialistas.	Programación intuitiva, Incluso mediante enseñanza

Tipo	Robot tradicional	Cobot
		manual.
Aplicaciones	Producción masiva, automoción, electrónica.	PYMES, procesos flexibles, Tareas colaborativas.
Costo y ROI	Mayor inversión inicial, alto rendimiento en grandes volúmenes.	Menor costo, rápido retorno en entornos dinámicos.

Nota. Esta tabla nos muestra las diferencias de un cobot y un robot tradicional.

Sensores de torque y fuerza: son dispositivos que miden la fuerza de torsión aplicada a un objeto, mientras que los sensores de fuerza miden la fuerza mecánica como tensión y compresión.

Diferencia Entre Sensor de Torque y Fuerza

Sensor fuerza: El sensor de fuerza es un dispositivo utilizado para medir fuerzas mecánicas como la tensión, la compresión y la presión, transformándolas en señales eléctricas proporcionales. Este tipo de sensor es ampliamente en procesos de fabricación, automatización industrial, debida a su precisión y confiabilidad en la medición de cargas mecánicas (FUTEK Advanced Sensor Technology, s.f.; IQS Directory, s.f.).

Sensor de torque: También conocido como sensor de par, es un dispositivo que mide la fuerza de torsión aplicada a un eje u objeto rotativo mediante la conversión de la deformación mecánica en una señal eléctrica. Su uso es esencial en aplicaciones como pruebas de motores, control de maquinaria industrial y sistemas robóticos, donde se requiere un control preciso del movimiento y la eficiencia mecánica (FUTEK Advanced Sensor Technology, s.f.; Motorba, s.f.).

En muchos cobots, los sensores de fuerza y torque se integran en un mismo dispositivo

llamado sensor de fuerza/torque (FT sensor), la Fuerza se relaciona con el empuje lineal y el torque se relaciona con el giro o torsión. Esto les permite “sentir” tanto la presión lineal como la torsión, logrando una interacción más segura y precisa con el entorno.

Ambos son complementarios y esenciales para que un cobot pueda trabajar de manera segura y eficiente junto a los humanos.

Se aplica en el medio automotriz, aeroespacial, y robótica entre otros.

Limitación de potencia: Es un principio de seguridad y diseño que busca que busca controlar la fuerza, velocidad y la energía que un robot puede aplicar durante su operación, especialmente si interactúa con humanos.

La limitación de potencia es lo que hace posible la colaboración segura entre humanos y robots, diferenciando a los cobots de los sistemas industriales convencionales, que priorizan fuerza y velocidad sobre interacción directa.

Modos de colaboración: en robótica industrial colaborativa, los modos colaboración son mecanismos definidos para permitir que los robots trabajen de manera segura junto a los humanos en un mismo espacio de trabajo. Estos modos de colaboración hacen posible que los cobots trabajen sin necesidad de barreras físicas, combinando seguridad, flexibilidad y productividad, mientras que los robots industriales tradicionales, al no contar con estas funciones integradas, requieren separación física para garantizar la seguridad.

Robótica Soldadura

Fundamentos de la Soldadura

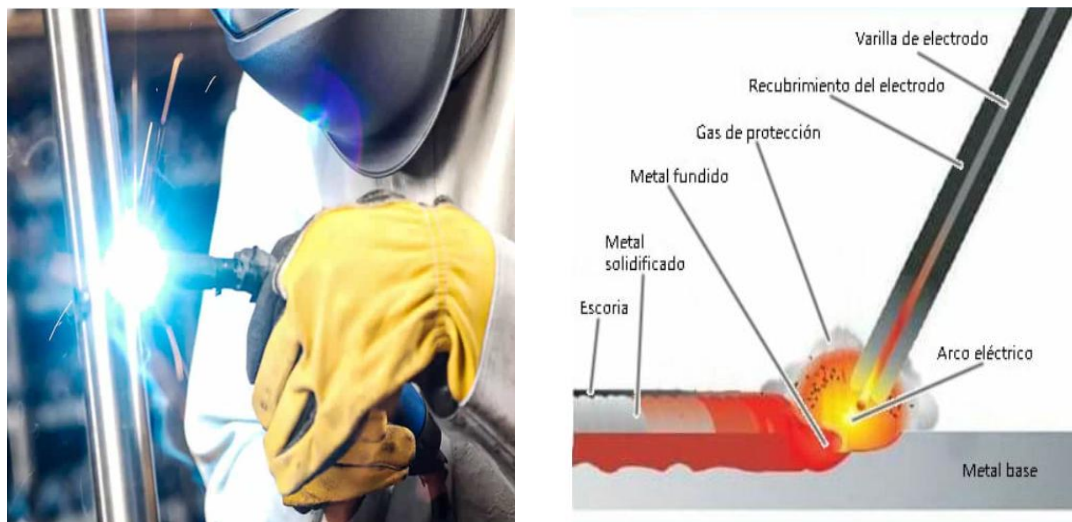
Arco eléctrico: Es la fuente de energía que permite fundir y unir metales mediante una carga eléctrica

Entre el electrodo y la pieza de trabajo. Este fenómeno genera temperaturas superiores a

3.000 °C, lo que asegura la fusión del material base y de material aporte. En la industria moderna, este proceso se combina con automatización y robótica para garantizar uniones de alta calidad, productividad y seguridad.

Figura 10

Soldaduras



Nota. En la imagen se muestra los tipos de revestimiento de los electrodos. Tomado de electrodos de soldadura smaw: significado técnico de cada dígito en su designación estandarizada. Yesid Orlando García Portilla (2025). Sager S.A

Se aplica en técnicas como SWAW (electrodo revestido), GMAW/MIG (gas protector con electrodo consumible), GTAW/TIG (electrodo no consumible con gas protector) y SAW (arco sumergido). Cada proceso se adapta a necesidades específicas de producción.

porte térmico: se refiere a la capacidad de los materiales soldados de soportar el calor y las tensiones generadas durante el proceso de soldadura. Este fenómeno es crucial para garantizar la calidad y la durabilidad de las uniones soldadas.

El porte térmico en soldadura industrial no solo implica como el calor afecta al material,

sino también como imparta la seguridad y rendimiento del trabajador. Una gestión integral requiere tanto tratamientos metalúrgicos como estrategias de protección laboral.

Figura 11

Defectos de Soldaduras

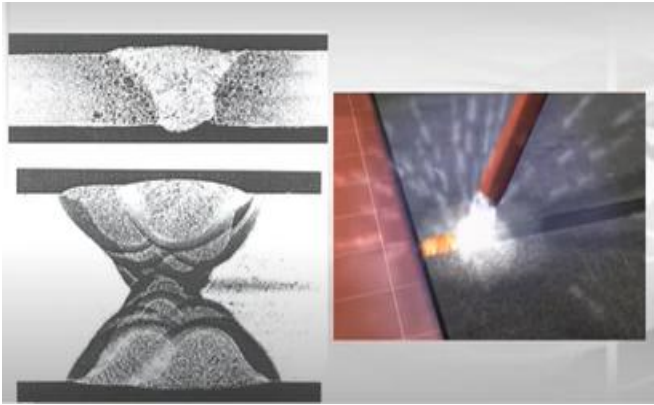


Nota. En la imagen se muestra los defectos de soldaduras por puntos y soluciones. Tomado de ¿Cuáles son los defectos comunes en la soldadura por puntos y cómo evitarlos? Manufacturing Engineering and Technology. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2024). Manufacturing engineering and Technology (7th ed.). Pearson. <https://www.zintilon.com/es/blog/solutions-to-common-defects-in-spot-welding/>

Zona afectada por el calor: La zona afectada por el calor (ZAC). en la zona industrial es la zona crítica que se encuentra alrededor del cordón de soldadura. Aunque no se funde como el metal de aporte o el baño de fusión, si experimenta cambios significativos debido a las altas temperaturas del proceso. En ella se producen transformaciones como crecimiento de grano, endurecimiento o pérdida de tenacidad, lo que puede reducir la resistencia y aumentar la su perceptibilidad a fallas. Su extensión depende de la energía de soldadura, la velocidad de avance y el tipo de material, por lo que controlar el aporte térmico y aplicar tratamientos adecuados es esencial para garantizar la calidad y durabilidad de la unión.

Figura 12

Zonas Afectadas por el Calor



Nota. En la imagen se muestra la zona de la unión soldada después de un proceso de ciclo térmico en esta zona ZAC. Tomado de LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC). Callister & Rethwisch, (2020). <https://soldaduraytecnologias.blogspot.com/2015/03/la-zona-afectada-por-el-calor-zac.html>

Influencia en propiedades mecánicas: La soldadura industrial de manera directa en las propiedades mecánicas de las uniones metálicas, ya que el proceso modifica la microestructura del material base y de la zona afectada por el calor. Estas variaciones determinan la resistencia, ductilidad y la tenacidad de la unión.

Algunos factores en los que más influyen son:

Proceso de soldadura: Técnicas como arco eléctrico, laser o MIG/MAG generan diferentes velocidades de enfriamiento y penetración, lo que cambia la dureza y resistencia del cordón.

Metalurgia de la soldadura: La cristalización, solidificación y enfriamiento afectan la formación de fases (martensita, ferrita, perlita). Que determinan la resistencia y fragilidad.

Zona afectada por el calor (ZAC): En esta región se producen transformaciones

microestructurales que pueden reducir la tenacidad y aumentar la dureza, generando riesgo de grietas.

Tratamientos térmicos posteriores: procesos como el revenido o normalizado ayudan a recuperar ductilidad y disminuir tensiones residuales.

Tipo de material base: Aceros inoxidable, al carbono o aleaciones ligeras reaccionan de manera distinta al calor, lo que condiciona la soldabilidad y las propiedades finales.

Tabla 3

Propiedades e Influencias de la Soldadura

Propiedad mecánica	Influencia de la soldadura
Resistencia a la tracción	Puede aumentar en el cordón, pero disminuir en la ZAC por fragilización.
Ductilidad	Tiende a reducirse por la formación de Microestructuras duras.
Tenacidad	Disminuye si hay enfriamiento rápido y Formación de martensita.
Dureza	Generalmente aumenta en la ZAC, lo que puede generar problemas de fractura.
Fatiga	Se ve afectada por defectos como porosidad, inclusiones o falta de fusión.

Nota. Esta tabla nos muestra Propiedades e influencias de la soldadura.

La soldadura no solo une materiales, sino que transforma sus características internas. Por eso, en la industria se controlan parámetros como la energía de aporte, la velocidad de

enfriamiento y los tratamientos posteriores para garantizar un equilibrio entre resistencia y ductilidad.

Sensibilidad al calor: La sensibilidad al calor en la soldadura industrial es un factor determinante en la calidad de las uniones metálicas, Un control térmico inadecuado puede generar defectos en las uniones, afectar la resistencia del material y comprometer la calidad final (Wiinspect, 2025). El metal experimenta un ciclo térmico complejo que involucra calentamiento, fusión, solidificación y enfriamiento continuo, lo que puede inducir tensiones residuales y fragilización si no se controla adecuadamente (MachineMFG, 2024).

Dominar los perfiles de temperatura de los distintos métodos de soldadura es crucial para lograr precisión y seguridad en aplicaciones industriales, especialmente en sectores de alta exigencia como el energético (Atizono Machinery, 2025). Estos hallazgos confirman que la sensibilidad al calor no solo depende del material base, sino también de la técnica empleada y de la gestión del ciclo térmico.

Figura 13

Daños e Incidentes Provocados por la Soldadura



Nota. En la imagen se muestra los daños que podría causar la soldadura y como se podrían

prevenir. Tomado de Daños e incidentes ocasionados por la soldadura y como prevenirlos.

Grecia Rubio, 2019. Abicor Binzel. <https://blog.binzel-abicor.com/es/da%C3%B1os-e-incidentes-ocasionados-por-la-soldadura-y-c%C3%B3mo-prevenirlos>.

Efectos Principales

Tabla 4

Efecto Térmico y Consecuencias en la Soldadura

Efecto térmico	Consecuencias en la soldadura
Sobrecalentamiento	Perdida de resistencia y deformaciones
Enfriamiento rápido	Fragilización, formación de microestructuras duras
Calor insuficiente	Uniones débiles, falta de fusión
Ciclos térmicos repetidos	Tensiones residuales, riesgos de grietas

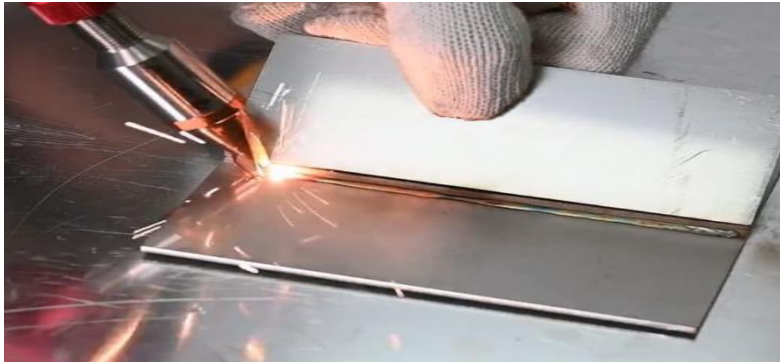
Nota. Esta tabla nos muestra Efecto térmico y consecuencias en la soldadura.

La sensibilidad al calor en soldadura industrial exige un control preciso de los parámetros térmicos para evitar defectos y garantizar un equilibrio entre resistencia, ductilidad y seguridad estructural.

Precisión requerida en soldadura: La precisión en la soldadura industrial es un factor crítico por que determina la calidad, seguridad y durabilidad de las uniones metálicas. En muchos sectores como la automoción, la energía, la construcción naval y la electrónica, incluso pequeñas desviaciones pueden generar fallos estructurales o pérdidas económicas significativas.

Figura 14

Máquinas de Soldadura Laser



Nota. En la imagen se muestra el proceso de soldadura laser. Tomado de Máquinas de soldadura láser fundamentos y funcionamiento. Steen, W. M., & Mazumber, J. (2010)

<https://www.heatsign.com/es/fundamentos-de-las-maquinas-de-soldadura-laser-y-como-funcionan/>

Factores de la Precisión en Soldadura

Tolerancias estrechas: en piezas de alta exigencia, las uniones deben cumplir tolerancias de micras o decimas de milímetro para garantizar el ajuste perfecto.

Control de parámetros: La corriente, voltaje, velocidad de avance y aporte de material deben mantenerse dentro de rangos muy específicos para evitar defectos como porosidad, falta de fusión o exceso de penetración.

Repetibilidad: En procesos automatizados, la precisión no solo se mide en una soldadura aislada, sino en la capacidad de repetir resultados idénticos en miles de piezas.

Calidad superficial: Una soldadura precisa es limpia, uniforme y sin irregularidades, lo que reduce retrabajos y mejora la estética del producto final.

Seguridad estructural: En aplicaciones críticas (puentes, tuberías de presión, aeronaves),

la precisión asegura que las uniones soporten cargas y condiciones extremas sin fallar.

Procesos MIG y TIG

La soldadura por arco eléctrico es una de las técnicas más utilizadas en la industria para unir metales de forma duradera. Dentro de ella, los procesos MIG (Metal Inert Gas) y TIG (Tungsten Inert Gas) destacan por su versatilidad y calidad, aunque cada uno responde a necesidades distintas.

MIG:(Gas Inerte de Metal) este proceso utiliza un gas inerte como el argón o helio, para proteger el baño de soldadura de contaminantes externos. Es ideal para aluminio y acero inoxidable, garantizando soldaduras limpias y precisas.

MAG:(Gas Activo de Metal) El proceso MAG utiliza un gas activo, como el dióxido de carbono, o mezclas de argón con CO₂. Este tipo de gas interactúa con el baño de fusión, mejorando la penetración y estabilidad del arco. Se usa para aceros al carbono y materiales ferrosos.

MIG: Rapidez y productividad

TIG: Precisión y calidad

Figura 15*Soldadura MIG*

Nota. En la imagen se muestra dos tipos de soldadura MIG/MAG y TIG. Tomado de Manual de Soldadura MIG Y TIG. Rodríguez, P. C. (2000).

<https://ideas.librosenpdfgratis.club/2022/07/22/manual-de-soldadura-mig-y-tig-pdf-gratis/>

Tabla 5*Aspectos MIG/TIG*

Aspecto	MIG	TIG
Electrodo	Hilo continuo consumible	Tungsteno no consumible
Gas protector	Argón, helio CO2 o mezclas	Argón puro (a veces helio)
Velocidad	Alta, ideal para producción	Baja más artesanal
Calidad del cordón	Buena, pero menos estética	Excelente, muy limpia
Aplicaciones	Carrocerías, estructuras,	Piezas críticas, metales

Aspecto	MIG	TIG
	producción masiva	especiales
Dificultad	Relativamente fácil de aprender	Requiere gran habilidad

Nota. Esta tabla nos muestra aspectos MIG y TIG.

Aplicaciones Típicas

Tabla 6

Proceso, Aplicaciones y Características Claves de la Soldadura MIG / TIG

Proceso.	Aplicaciones típicas.	Característica calve.
MIG	Industria automotriz (carrocería, chasis) Construcción metálica y estructuras. Fabricación de maquinaria y equipo. Reparación rápida en acero y aluminio.	Alta productividad y facilidad de automatización.
TIG	Industria aeroespacial y nuclear Equipos médicos y electrónicos Soldadura de metales especiales	Máxima calidad y control en la soldadura.

Nota. Esta tabla nos muestra el Proceso, aplicaciones y características claves de la soldadura MIG / TIG.

Ventajas y Desventajas

Tabla 7

Cuadro Comparativo de Ventajas y Desventajas de MIG y TIG

Proceso	Ventajas	Desventajas
MIG (Metal Inerte Gas)	Alta velocidad de soldadura Fácil de aprender a operar Ideal para producción en serie y metales gruesos Alimentación continua de hilo, mayor productividad.	Cordones menos estéticos Genera más salpicadura Menor control de arco No tan adecuada para materiales delgados o trabajos de precisión.
TIG (Tungsteno Inerte Gas)	Cordones limpios, precisos y de alta calidad. Excelente para materiales Delgados y especiales. Mayor control de arco y Baño de fusión.	Proceso más lento Requiere mayor habilidad del soldador. Equipos y consumibles más costosos Menos productivo en Grandes volúmenes.

Nota. Esta tabla nos muestra el Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de MIG y TIG.

Control de trayectoria: El control de trayectorias en la soldadura industrial es crucial para garantizar la precisión y calidad de los trabajos. Los sensores utilizados en la automatización de soldaduras son esenciales para el control de trayectorias, la distancia y las inspecciones de calidad.

En soldadura por puntos, así como en procedimientos de fabricación aditiva y en soldadura robotizada, todos los pasos del proceso están cronometrados y realizados con la máxima precisión. Esto aumenta la necesidad de sensores para el control de trayectorias, control de distancias e inspecciones de calidad.

Figura 16

Procesos de Soldadura Automatizado



Nota. En la imagen se muestra los procesos de soldadura automatizados. Tomado de control de trayectoria en automatización de soldaduras. <https://mesurex.com/control-de-trayectoria-en-automatizacion-de-soldaduras/>

Control de Velocidad

El control de velocidad en soldaduras industriales es un factor crítico para garantizar la calidad del cordón, la eficiencia energética y la seguridad del proceso. La velocidad de soldadura influye directamente en la penetración, la formación de defectos y la productividad.

La velocidad de alimentación del alambre, el voltaje y el gas de protección son parámetros críticos que deben ser ajustados adecuadamente para lograr resultados óptimos.

Comparación de efectos según la velocidad:

Tabla 8

Velocidad, Efectos y Riesgos en el Cordón de la Soldadura

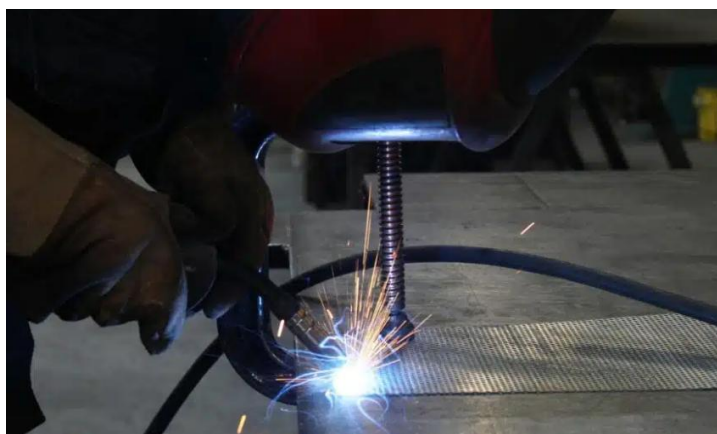
Velocidad de soldadura.	Efecto en el cordón.	Riesgos principales.
-------------------------	----------------------	----------------------

Baja (lenta)	Cordón ancho, alta penetración.	Exceso de calor, deformaciones
Optima	Cordón uniforme, buena fusión.	Alta calidad, mínimo retro trabajo
Alta (rápida)	Cordón estrecho, baja penetración.	Porosidad, falta de resistencia.

Nota. Esta tabla nos muestra el Velocidad, efectos y riesgos en el cordón de la soldadura.

Figura 17

Soldadura de Superficie Metálica



Nota. En la imagen se muestra los procesos de soldadura MIG. Tomado de The Fundamentals of Welding on Sheet Metal and Other Metal Materials <https://www.smetals.co.uk/the-fundamentals-of-welding-on-sheet-metal-and-other-metal-materials/>

Factores que influyen en la velocidad de soldadura robótica:

Proceso y técnica de soldadura

Tipo de material y espesor

Configuración del robot

Fuente de alimentación y configuración

Control de aporte térmico: El aporte térmico durante un proceso de soldeo es el calor aportado para realizar la soldadura; es una variable muy importante a efectos de la calidad de la unión y podrá estar limitado cuando se realizan las soldaduras de determinados materiales. El aporte térmico se refiere a la cantidad de energía introducida en el material durante el proceso de soldadura, y su manejo adecuado impacta directamente en la resistencia mecánica, la microestructura y la durabilidad de la soldadura.

Figura 18

Soldaduras



Nota. En la imagen se muestra los procesos de soldadura. Tomado de tipos de soldadura y sus diferentes métodos. Solda Electric (2021). <https://www.soldaelectric.com/blog/noticias/tipos-de-soldadura-y-sus-diferentes-metodos>

*Estrategias de Control***Tabla 9***Estrategia, Aplicación y Beneficios de la Soldadura*

Estrategia	Aplicación	Beneficio
Pre calentamiento controlado	Aceros de alta resistencia	Reduce tensiones y riesgos de grietas
Secuencia de soldadura	Construcciones metálicas	Minimiza distorsiones acumuladas
Uso de Inter pasos fríos	Soldadura multipaso	Permite disipar calor entre cordones
Tecnologías avanzadas (laser, TIC pulsado)	Aluminio y aleaciones ligeras	Precisión en aporte térmico, menos deformaciones
Monitoreo en tiempo real	Robots colaborativos y automatización	Ajuste dinámico de parámetros

Nota. Esta tabla nos muestra la Estrategia, aplicación y beneficios de la soldadura.

Repetitividad: La repetitividad en soldaduras industriales se refiere a la capacidad de ejecutar uniones metálicas con la misma calidad, precisión y consistencia en múltiples piezas o ciclos de producción. Es un factor clave en la manufactura moderna, especialmente en sectores como la automotriz, aeroespacial y metalmecánico, donde la uniformidad garantiza seguridad y productividad.

Algunos factores que influyen en la repetitividad son:

Automatización de procesos

Robotización

Control de parámetros

Mantenimiento de equipos

Condiciones del material.

Algunos beneficios son:

Reducción de defectos y retrabajos

Mayor productividad y velocidad de fabricación

Homogeneidad en la calidad del producto final

Mejoría en la seguridad de estructuras críticas

Optimización de costos al disminuir desperdicios

La repetitividad en las soldaduras industriales es un indicador de madurez tecnológica y organizativa. Las empresas que integran automatización y robotización logran procesos más confiables, competitivos y rentables.

Figura 19

Exactitud y Repetibilidad.



Nota. En la imagen se muestra si existe Repetibilidad y exactitud uniforme. Tomado de mediciones confiables- Decisiones correctas. Quality (2025). <https://www.quality.cl/mediciones->

confiables-decisiones-correctas/ss-circulos/

Sistemas de Seguimiento de Junta

En la soldadura industrial automatizada, los sistemas de seguimiento de junta desempeñan un papel esencial para garantizar la calidad y la eficiencia del proceso. Estos sistemas permiten que la antorcha se mantenga alineada con la unión de las piezas, incluso cuando existen variaciones geométricas, tolerancias dimensionales o desviaciones en el posicionamiento. Su implementación reduce el retrabajo, mejora la repetitividad y asegura cordones de alta precisión.

Entre las tecnologías más relevantes se encuentran:

Los sensores laser, utilizados para detectar el inicio y el final del cordón de soldadura y ajustar la posición de la antorcha en tiempo real. Estos sensores ofrecen gran velocidad de respuesta y son capaces de operar en ambientes industriales hostiles, garantizando estabilidad y precisión (GarLine, 2023).

Los sistemas mecanizados de seguimiento, como los Seam Tracker, proporcionan un control automatizado y preciso en procesos de soldadura SAW, GMAW, FCAW y GTAW. Estos sistemas reducen la necesidad de intervención manual y aseguran la continuidad del cordón en trayectorias largas o complejas (Lincoln Electric, 2022).

Los sistemas de guiado inteligente detectan desviaciones mínimas en la unión de la pieza de trabajo y ajustan la trayectoria en tiempo real (Abicor Binzel, 2023).

Figura 20

Robótica Industrial



Nota. En la imagen se muestra una maquina robótica industrial. Tomado de <https://www.exapro.es/fanuc-r1000ia80f-p250312077/>

Soldadura de Reparación

Variabilidad geométrica: La variabilidad geométrica en la soldadura de reparación puede ser un problema significativo que afecta la calidad y durabilidad de las piezas soldadas. Esta variabilidad puede manifestarse en la forma, tamaño y geometría de la unión soldada, lo que puede comprometer la integridad estructural y funcional del producto final. Para abordar la variabilidad geométrica en la soldadura de reparación, es esencial seguir un proceso de soldadura controlado y utilizar técnicas de soldadura adecuadas. (Montaño Vizcaíno & Calderón Guzmán, 2025).

Factores de variabilidad geométrica en reparaciones:

Desgaste irregular: grietas porosidades o pérdidas de material. (Cortes Arias et al., s.f.).

Distorsión previa: piezas que ya han sufrido deformaciones térmicas o mecánicas.

Tolerancias reducidas: en componentes críticos (turbinas, moldes, estructuras metálicas)

(Montaño Vizcaíno & Calderón Guzmán, 2025).

Accesibilidad limitada: zonas de difícil acceso que condicionan el tipo de proceso y herramienta de soldadura.

La variabilidad geométrica convierte la soldadura de reparación en un proceso menos repetitivo y más artesanal o inteligente, donde la combinación de medición precisa, control adaptativo y experiencia técnica es esencial.

Figura 21

Discontinuidades de Soldaduras



Nota. En la imagen se muestra discontinuaciones de soldaduras. Tomado de Causas y Soluciones de Discontinuidades en Soldadura – STEEL. <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-de-buenos-aires/estructuras-soldadas/causas-y-soluciones-de-discontinuidades-en-soldadura-steel/147594076>

Piezas no estandarizadas: En soldadura de reparación, las piezas no estandarizadas son aquellas que no siguen dimensiones, geometrías o materiales definidos por normas industriales. Esto ocurre con frecuencia en mantenimiento, restauración de maquinaria, estructuras metálicas antiguas o componentes fabricados artesanalmente.

Características de piezas no estandarizadas: En esta sección vamos a explicar las características de las piezas no estandarizadas que se utilizan para extender la vida útil de

componentes dañados o reparados.

Geometría irregular: formas complejas, desgastes o deformaciones que dificultan el ajuste.

Materiales desconocidos o mixtos: aceros de distintas calidades, fundiciones, aleaciones no identificadas.

Ausencia de planos o especificaciones: se trabaja con la pieza tal cual está, sin documentación técnica.

Variedad dimensional: tolerancia fuera de forma, lo que exige ajustes manuales.

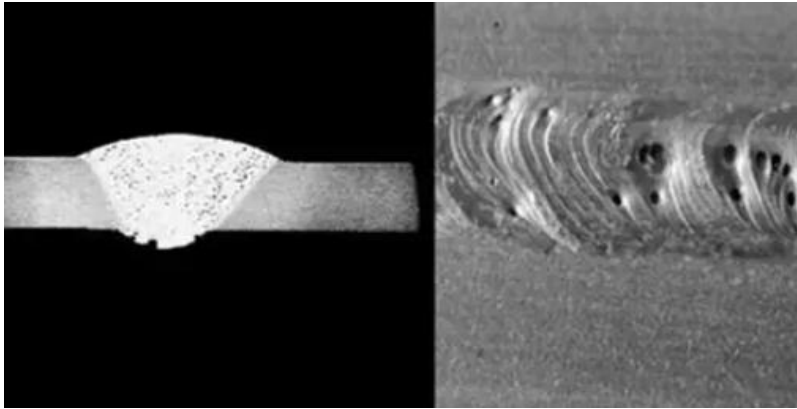
Identificación de material: necesario para elegir el electrodo o proceso adecuado.

Compatibilidad metalúrgica: riesgo de grietas, porosidad o falta de fusión si se mezclan materiales incompatibles.

Es fundamental que los trabajadores de la soldadura de reparación estén bien capacitados y familiarizados con las normativas y procedimientos aplicables para garantizar la seguridad y calidad de las reparaciones. Además, se deben implementar acciones preventivas y correctivas para evitar defectos y asegurar que las reparaciones sean efectivas y seguras.

Figura 22

Defectos de Soldaduras



Nota. En la imagen se muestra defectos causados al momento de aplicar soldaduras. Tomado de 16 tipos comunes de defectos de soldadura en 2026, causas y soluciones. Chan, V. (2023).

<https://www.rapiddirect.com/es/blog/types-of-welding-defects/>

Desgaste irregular: El desgaste irregular en la soldadura de reparación puede ser causado por varios factores, incluyendo la elección incorrecta del método de soldadura. Patrones de soldadura incorrectos, o condiciones ambientales desfavorables. Estos defectos pueden comprometer la integridad estructural y la seguridad de las uniones soldadas. Para prevenir el desgaste irregular, es esencial utilizar técnicas de soldadura adecuadas, seleccionar materiales y métodos de soldadura apropiados, y realizar pruebas no destructivas para detectar y reparar rápidamente cualquier defecto que pueda existir.

Algunas causas pueden ser:

Preparación deficiente de la superficie.

Parámetros de soldadura incorrectos.

Técnica inadecuada del soldador.

Condiciones ambientales adversas.

Material base deteriorado.

Cuadro Comparativo Desgaste Irregular

Tabla 10

Cuadro Comparativo de Desgaste Irregular

Aspecto	Descripción	Ejemplo practico	Solución recomendada
Causa técnica	Parámetros de soldadura mal ejecutados. (voltaje, amperaje)	Cordón con exceso de penetración en un lado y falta en el otro.	Ajustar parámetros según material y espesor, usar procedimientos calificados
Causa material	Superficie Contaminada (oxido, grasa, pintura) material base Fatigado.	Reparación en tubería Corroída con porosidad Irregular.	limpieza mecánica, química previa, inspección del material Base.
Causa operativa	Técnica deficiente del soldador (movimientos inconsistentes)	Cordón con variaciones de ancho y altura.	Capacitación y práctica en técnicas de reparación específicas.
Causa ambiental	Corriente de aire humedad, temperatura Inadecuada.	Soldadura al aire libre con porosidad dispersa.	Controlar entorno del trabajo, usar pantallas protectoras.

Aspecto	Descripción	Ejemplo practico	Solución recomendada
Consecuencia mecánica	Reducción de resistencia y aparición de concentradores de tensión.	Fisuras en zonas reparadas sometidas a carga.	Ensayos no destructivos (ultrasonido, líquidos, penetrantes) para variar calidad.
Consecuencia económica	Rechazo en control de calidad, retrabajos y Costos adicionales.	Piezas rechazadas e Inspección final.	Implementar control de calidad en cada Etapa del proceso.

Nota. Esta tabla nos muestra un cuadro comparativo de desgaste irregular. .

Dificultades para automatización: La automatización en soldadura de reparación enfrenta varios desafíos que pueden obstaculizar su implementación y éxito. Entre los principales problemas se encuentran la falta de habilidades y mano de obra cualificada, la escasez de recursos tecnológicos y la resistencia al cambio por parte del personal. Estos factores pueden comprometer la calidad de las soldaduras y la integridad estructural de los productos finales. Para superar estos desafíos, es fundamental invertir en programas de formación y desarrollo de habilidades, así como en la adopción de tecnologías automatizadas y la integración de sistemas inteligentes en los procesos de producción. La gestión de la calidad y la documentación de los procesos de soldadura son cruciales para garantizar la conformidad con los estándares y requisitos del cliente.

Metodología

Enfoque y Diseño Metodológico

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cualitativo, mediante una monografía analítica de alcance descriptivo analítico, orientada a determinar las aplicaciones potenciales y las limitaciones técnicas del robot colaborativo FANUC CRX-25iA en procesos de soldadura de mantenimiento en el Taller de Alta Ingeniería de la CHEC.

El diseño metodológico es no experimental, dado que no se realizaron pruebas de campo ni manipulación directa de variables. En su lugar, se llevó a cabo un análisis documental sistemático de literatura científica, normativa técnica y documentación del fabricante, interpretada y contextualizada al entorno productivo del taller.

El método de revisión documental se fundamentó en la recopilación, selección y análisis de fuentes académicas y técnicas publicadas entre 2015 y 2025, incluyendo artículos científicos, documentos de fabricantes y publicaciones especializadas en robótica industrial y automatización. La búsqueda se realizó en bases de documentos como google académico, Scopus e IEEE Xplore, lo que garantizó la pertinencia y actualidad de la información consultada.

Para la búsqueda de información se definieron criterios relacionados con la automatización colaborativa y la soldadura industrial, empleando palabras claves en inglés y español con el fin de ampliar un espectro de resultados y obtener información específica sobre aplicaciones reales, entre ellas se incluyeron: “cobots in Welding”, “collaborative Robotics,” “industrial automation”, “human-robot collaboration”, “safety in collaborative Welding”, “Industry 4.0 in maintenance”, “collaborative robots”, “industrial Welding Robotics” y “flexible manufacturing”.

Estas palabras claves fueron usadas Mediante Cadenas de búsqueda como : "collaborative

robot" OR "cobot" OR "collaborative robotics" AND "welding" OR "industrial welding" OR "robotic welding"; "human-robot collaboration" OR "human robot interaction" AND "welding" OR "industrial processes" AND "safety" OR "ergonomics"; "collaborative robots" AND "flexible manufacturing" OR "Industry 4.0" AND "industrial automation" ; "collaborative welding" AND "industrial application" OR "maintenance" OR "manufacturing" ; "FANUC CRX" OR "FANUC collaborative robot" AND "welding".

Este procedimiento permitió identificar documentos relevantes que describen ventajas, limitaciones y resultados de la integración de cobots en procesos de soldadura. Los cuales fueron sistematizados siguiendo las recomendaciones metodológicas de la revisión documental (Snyder, 2019; Page et al. 2021).

Fases Metodológicas

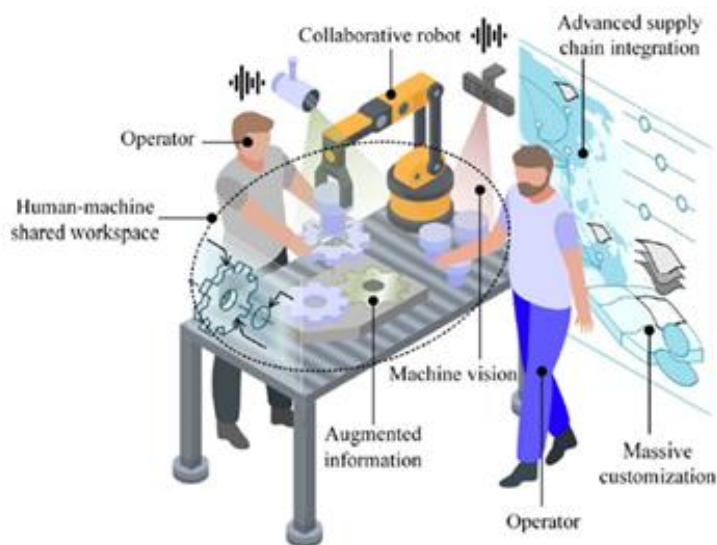
Fase 1 Revisión de Literatura Científica Sobre Robótica Colaborativa Aplicada a Procesos de Soldadura y Mantenimiento Industrial

La robótica colaborativa es una rama de la tecnología que se centra en el diseño y uso de robots, conocidos comúnmente como cobots, creados específicamente para trabajar juntamente con los seres humanos en un espacio de trabajo compartido (Tannous, M. *et al.*, 2020) Lo que desencadena en aspectos claves que permiten la interacción entre ellos.

A diferencia de la robótica tradicional, que busca reemplazar el trabajo manual, la robótica colaborativa busca armonizar la adaptabilidad humana con la precisión robótica. Mientras que los humanos aportan creatividad, resolución de problemas y flexibilidad, los robots ofrecen consistencia y eficiencia en tareas repetitivas o pesadas (ver figura 1). Según (Chaiprabha, K *et al.* 2025), este enfoque es el pilar de la Industria 5.0, que prioriza el bienestar del trabajador y la personalización.

Figura 23

Cobots



Nota. En la imagen se muestra un ejemplo de interacción humano-robot. Tomado de Advancing Industry 5.0: Collaborative Welding Robotics With Precision, Safety, and Flexibility.

Kantawatchr, C., Setthibhak, S., y Chanchaoren, R. (2025)

DOI:10.1109/ACCESS.2025.3588515

Una de las diferencias más drásticas con los robots industriales convencionales es que los cobots no requieren vallas de seguridad ni barreras físicas. Están equipados con sensores táctiles, de fuerza y de proximidad avanzados que les permiten detectar la presencia humana en tiempo real. Si un cobot detecta un contacto inesperado o una colisión, el sistema está programado para detenerse o reducir su fuerza y velocidad de inmediato para evitar lesiones.

Los cobots están diseñados para ser herramientas "plug-and-play". En (Ferreira, N. F. 2023; Kakade, S *et al.*, 2023) se destaca que no se necesita ser un ingeniero experto para programarlos, un operario puede "enseñar" al robot una trayectoria simplemente moviendo el

brazo robótico con la mano hacia los puntos deseados. Utilizan pantallas táctiles e interfaces visuales amigables que permiten configurar tareas mediante bloques de comandos sencillos. E incluso, (Starke, G *et al.*, 2016) es interesante porque explora la auto organización y coordinación de equipos de robots heterogéneos (como ABB y KUKA trabajando juntos) en tareas de soldadura complejas, eliminando la necesidad de programar cada movimiento manualmente.

Según Bi, Z. M *et al* (2021) y Arjomandi, M, *et al.*, (2026) no toda la robótica colaborativa es igual. Existen diferentes niveles de relación entre el humano y el robot:

Coexistencia: Comparten el mismo espacio, pero realizan tareas distintas sin interactuar.

Cooperación: Trabajan en la misma pieza o tarea, pero en momentos diferentes.

Colaboración Real: Humano y robot trabajan simultáneamente y de forma coordinada en la misma tarea, donde las acciones de uno afectan directamente al otro (ver figura- 2).

Figura 24

Interacción Humano - Robot



Nota. En la imagen se muestra un humano trazando la guía a un cobot. Tomado de optimizing

the usability and integration of collaborative robots in the welding industry. C. Cella, M. Faroni, A. Zanchettin y P. Rocco, (2024). <https://urn.fi/urn:nbn:fi-fe20251205115201>

La literatura científica (Stewart, J. 2025). Resalta que los cobots ayudan a mitigar la escasez de mano de obra calificada y protegen la salud de los trabajadores al asumir las tareas "Dull, Dirty and Dangerous" (aburridas, sucias y peligrosas), como la soldadura con humos tóxicos o el levantamiento de cargas pesadas. Por lo que un cobot no es solo una máquina, es un "colega técnico" diseñado para mejorar la seguridad, la ergonomía y la productividad en el entorno industrial moderno.

Algunos robots que ayudan a estas labores son:

FANUC CRX 10iA: El FANUC CRX-10iA es un robot colaborativo el cual está orientado a realizar tareas industriales como son soldadura ligera y manipulación de piezas, donde reduce la exposición del trabajador a humos tóxicos, calor y posturas no ergonómicas, contribuyendo notablemente a la mejora de la seguridad laboral (FANUC América, 2025).

FANUC CRX-25iA: El FANUC CRX25-iA está diseñado para realizar tareas que son físicamente exigentes como son paletizado, carga y descarga de máquinas y manipula con de cargas pesadas, disminuyendo significativamente el riesgo de lesiones musculoesqueléticas asociadas al levantamiento manual repetitivo (FANUC América, 2025).

UNIVERSAL ROBOTS UR10e: El UR10e es un cobot ampliamente utilizado en procesos de soldadura y manejo de materiales peligrosos, permitiendo así poder retirar al operario de las zonas con radiación, chispas y humos nocivos, sin eliminar la supervisión humana del proceso (Universal Robots,2025).

UNIVERSAL ROBOTS UR16e / UR20: Los modelos UR16e y UR20 están destinados a realizar trabajos repetitivos y de alto esfuerzo físico, clasificados como tareas Dirty and

Dangerous, reduciendo significativamente la fatiga laboral y los accidentes derivados del sobreesfuerzo en entornos industriales (Universal Robots, 2025).

KUKA LBR iiwa: El KUKA LBR iiwa es un robot colaborativo avanzado con sensores de torque en todas sus articulaciones, lo que le permite interactuar de una forma segura con el trabajador humano y puede asumir tareas peligrosas o no ergonómicas, consolidándose como un asistente técnico en la industria moderna (KUKA AG,2026).

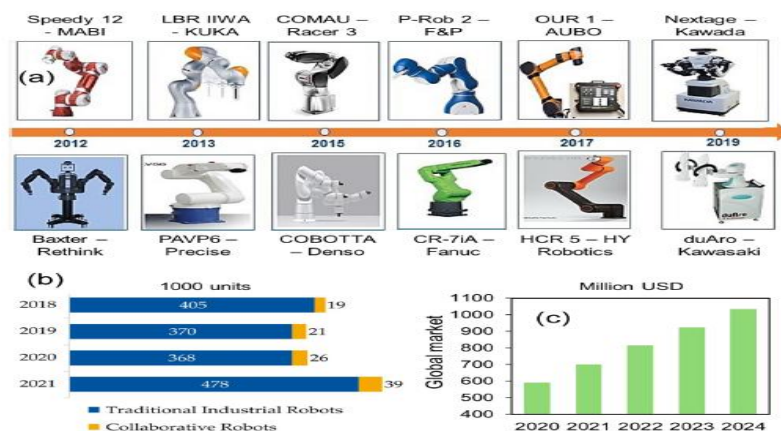
Por lo cual, La instalación de cobots (robots colaborativos) en la industria mundial actual atraviesa un periodo de crecimiento acelerado y transformación estratégica, impulsado por la transición hacia la Industria 5.0. Esta tecnología no solo busca la automatización, sino la sinergia entre la flexibilidad humana y la precisión robótica (Chaiprabha, K. *et al.* 2025; Pauliková, A. *et al.* 2021).

A nivel mundial, las ventas de robots industriales crecieron un 114% entre 2013 y 2017, y se proyectó que la cuota de mercado de los cobots pase del 3% en 2018 al 34% para 2025 (Pauliková, A. *et al.*, 2021; Bi, Z. M. *et al.*, 2021). Por su parte, Se estima que el valor total del mercado de cobots alcance entre 8,000 y 12,000 millones de dólares para el periodo 2025-2030 (Polonara, M. *et al.*,2024; Bi, Z. M. *et al.*, 2021; Wang, K. *et al.*, 2025).

Marcas y Calidad

Figura 25

Estadísticas del Uso del Cobot



Nota. En la imagen se muestra estadísticas del uso actual de cobots en la industria. Tomado de a review of applications of collaborative robot in welding and additive manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. M. Arjomandi y T. Mukherjee, (2026) <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2026.103256>

El 73% de la cuota de mercado se concentra en cinco países: China, Japón, Estados Unidos, República de Corea y Alemania (Calvo, R. *et al.*, 2022). China, en particular, se ha consolidado como el mercado más grande del mundo para robots industriales (Chen, Z, 2025).

A pesar del auge, estudios en regiones como Baden-Württemberg (Alemania) indican que el 96% de los nuevos puestos de trabajo en PYMES aún se instalan sin robots, lo que representa un campo de expansión masivo para la robótica colaborativa (Schumacher, S. *et al.*, 2022).

SPEED 12 MABI: El SPEEDY 12-MABI es un robot colaborativo de 6 ejes desarrollado por Mabi Robotics AG, contiene una carga útil de 12 kg, alcance de 1250 mm y Repetibilidad de ± 0.1 mm, diseñado para tareas de manipulación y ensamble industrial (Qviro.s.f.; GlobalSpec,

d.f.). destaca por el uso de encoders absolutos en cada articulación y sensores de fuerza integrados, lo que permite una alta precisión y trabajo seguro junto a operarios sin barreras físicas (RoboticsBiz, 2021).

LBR iiwa- KUKA (2023): El LBR iiwa es un robot colaborativo de 7 grados de libertad con sensores de torque en todas sus articulaciones, lo que le permite interactuar de una forma segura con los humanos sin jaulas de protección. Su alta precisión y control de la fuerza lo hacen idóneo para ensamblaje fino, investigación y robótica médica, siendo además la base tecnológica de sistemas médicos colaborativos certificados (KUKA AG, 2023; Hubert et al., 2023).

EL COMAU Racer- 3: Es un robot industrial articulado de 6 ejes, está diseñado para aplicaciones donde se maneja alta velocidad y precisión en manufactura ligera. Posee una carga útil de 3kg, un alcance de 630 mm y una Repetibilidad de ± 0.02 mm, lo que lo hace adecuado para procesos como ensamblaje, pick and place y dispensado en espacios reducidos (Comau, s.f.).

P-Rob-2 F&P: El P-Rob 2 es un robot colaborativo desarrollado por F&P Robotics este fue presentado en el 2016, su diseño se basó en la interacción segura humano-robot, cuenta con 6 grados de libertad, 3kg de carga útil y una programación intuitiva mediante u software myP, fue orientado a aplicaciones industriales ligeras y educativas (F&P Robotics, 2016; Roboticstomorrow, 2016).

OUR I- AUBO: Estos son una serie de robots colaborativos de AUBO Robotics, fue lanzada alrededor de 2017, fue diseñada para trabajar de forma segura unto a las personas. Se trata de un brazo robótico de 6 grados de libertas, con un modelo de 3 a 20 kg de carga, utiliza una limitación de potencia y fuerza. Gracias a su arquitectura abierta, programación por guiado manual y compatibilidad ROS, el OUR-i se puede emplear en aplicaciones industriales flexibles

como también en la investigación y educación. (AUBO Robotics, s.f.; AUBO Robotics USA, s.f.; Paperzz, s.f.).

Nextage- Kawada: Es un robot con un estilo humanoide industrial colaborativo de doble brazo desarrollado por Kawada Robotics Corporation, este robot fue diseñado para trabajar de forma segura junto a los seres humanos en tareas de ensamblaje y automatización flexible. Cuenta con 15 grados de libertad, un sistema de visión integrado contiene versiones tanto industriales como de investigación, lo que lo convierte en una plataforma ampliamente utilizada en la industria y en el ámbito académico (Casada Robotics Corporación, s.f.; Robotics Guido, s.f.).

Baxter- Rethink: Es un robot industrial colaborativo, fue desarrollado por Rethink Robotics, este fue diseñado para realizar trabajos de forma segura junto a personas y facilitar la automatización. Contiene 2 brazos articulados, sensores y actuadores elásticos, permitió la programación por demostración y tuvo amplia adopción académica. Aunque fue discontinuado en 2018, Baxter sentó las bases de la robótica colaborativa moderna (Brooks,2012; Rethink Robotics, 2015)

PAVP6- Precise: Precise Automation es una denominación académica o interna que describe un sistema de automatización con robot colaborativo de 6 ejes también contiene visión artificial, está basado en tecnologías de Precise Automation. El sistema se caracteriza por su operación segura sin barreras, su alta precisión y flexibilidad, siendo adecuado para aplicaciones educativas, de laboratorio e industriales ligeras (Precise Automation, 2023; Brooks Automation, 2021).

Aplicaciones en Procesos de Soldadura

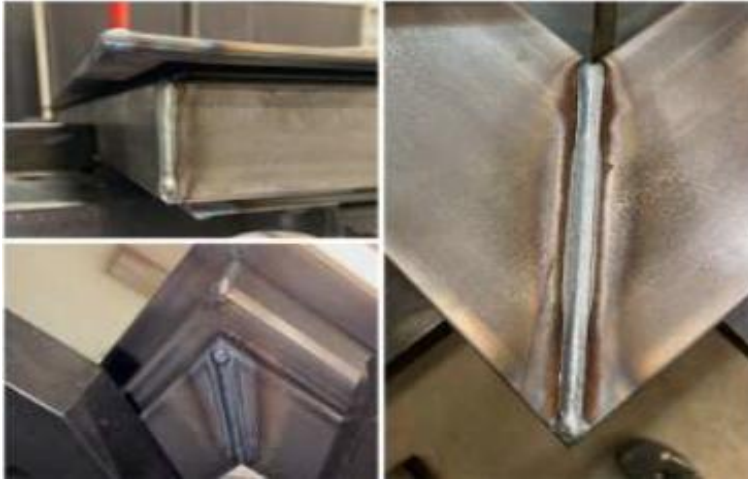
La aplicación de la robótica colaborativa en la soldadura es, efectivamente, uno de los

campos de mayor crecimiento debido a su capacidad para transformar tareas peligrosas y monótonas en procesos eficientes y seguros. Los cobots, son ideales para entornos de alta mezcla y bajo volumen (high-mix/low-volume), donde los ciclos de producción cambian frecuentemente y se requiere una reconfiguración rápida del flujo de trabajo ((Schumacher, S. *et al.*, 2022; Erdős, F. G *et al.*, 2024).

Además, la industria enfrenta una crisis de vacantes, especialmente en sectores como la soldadura, donde se prevén miles de jubilaciones para 2027. Los cobots ayudan a cubrir este déficit aumentando la productividad por trabajador (Stewart, J. 2025; Liu, H.Y. *et al.*, 2026).

La literatura científica confirma que los cobots se han integrado con éxito en los procesos industriales, en diversas técnicas de unión, adaptándose a las necesidades de precisión y flexibilidad de la industria:

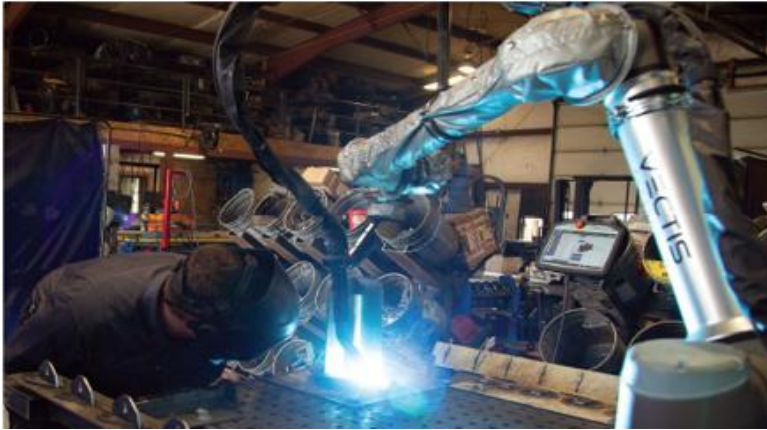
Gas Metal Arc Welding (GMAW / MIG/MAG): Es la aplicación más extendida para la automatización colaborativa. Sistemas como MyWelder permiten que operarios sin experiencia previa en programación definan trayectorias de soldadura MIG moviendo físicamente el brazo del robot ("lead-through programming") (Ferraguti, F. *et al.*, 2023). Esta tecnología permite soldar materiales desde calibres finos (16) hasta placas gruesas de media pulgada (Campbell, J. *et al.*, 2020). (Ver figura 4.).

Figura 26*Soldadura*

Nota. En la imagen se muestra ejemplos de soldadura por cobot. Tomado de this is an electronic reprint of the original article. K. Jokinen (2021).

https://issuu.com/telu_oamk/docs/telulainen_vol2_nro4

Gas Tungsten Arc Welding (TIG / GTAW): Este proceso, conocido por su alta calidad y dificultad técnica, se beneficia de los cobots mediante el uso de interfaces híbridas (Tannous, M *et al.*, 2020). Se han desarrollado simulaciones bajo sistemas ARM Cortex para evaluar las curvas de trayectoria específicamente en soldadura TIG colaborativa (Gao, S. *et al.*, 2024) (ver figura 5.).

Figura 27*Soldadura TIG Colaborativa*

Nota. En la imagen se muestra ejemplos de soldadura TIG colaborativa. Tomado de Cobot Welding Offers the Spark to Overcome Labor Shortages. Campbell y Pawley (2020).

<https://static.goexposoftware.com/nascc22/FORMfields/uploads/pressreleasescurprurlo1fqjg7cij1ssqpnskki15h7d218.pdf>

Resistance Spot Welding (Soldadura por puntos): Utilizada frecuentemente en la industria automotriz y aeroespacial (ver figura 6.). La investigación actual emplea cobots con control de cumplimiento (compliance-controlled) para integrar componentes en estructuras complejas como fuselajes de aviones (Endraß, M. *et al.*, 2022).

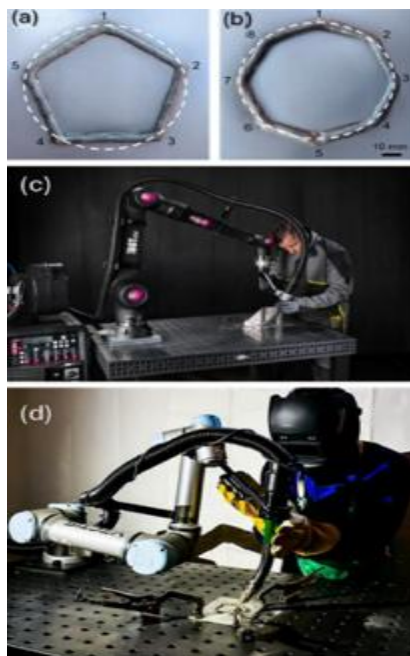
Figura 28*Soldadura Industrial*

Nota. Ejemplo de soldadura en industria automotriz. Tomado de Applications of collaborative robots in agile manufacturing: a review. *Robotic Systems and Applications*. Kakade, S., Patle, B., Umbarkar, A. y Patle, B. (2023). DOI <https://doi.org/10.21595/rsa.2023.23238>.

Laser Beam Welding (Soldadura Láser): Se destaca el uso de Gemelos Digitales (Digital Twins) para corregir en tiempo real la costura de soldadura láser, logrando una precisión tal que garantiza juntas impermeables (Chaiprabha, K. *et al.*, 2025) (ver figura 7).

Figura 29

Soldadura Láser



Nota. Ejemplo de Alta precisión en la soldadura con cobot. Tomado de a review of applications of collaborative robot in welding and additive manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Arjomandi y Mukherjee (2026). <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2026.103256>.

Todos estos tipos de trabajos automatizados por cobots no están limitados a una sola industria, sino que se despliegan en sectores estratégicos:

Construcción e Infraestructura: En la edificación de rascacielos, los cobots sueldan componentes de acero estructural con una velocidad tres veces superior al trabajo manual, logrando rendimientos de hasta 82 metros lineales diarios (Crawford, M. L *et al.*, 2026). Por su parte (Zhang, W. *et al.*, 2024). enfoca el uso de robots de soldadura inteligentes en la construcción de estructuras de acero para edificios, integrando algoritmos de detección visual para mejorar la calidad en estructuras complejas

Industria Naval (Shipbuilding): Se investiga el uso de celdas colaborativas para soldar estructuras de cascos de barcos y refuerzos (stiffeners), especialmente en astilleros de pequeña escala donde el espacio es limitado (Poolsilapa, B, 2025; Chaiprabha, K. *et al.*, 2025).

Mantenimiento y Energía: Los sistemas automatizados son claves en la restauración de tuberías de instalaciones energéticas (térmicas y nucleares), mejorando la fiabilidad de las uniones en condiciones de alta carga operativa (Duhanets, V. *et al.*, 2025). Por su parte Malik, A. A, *et al.*, (2026), es importante porque aplica cobots en la fabricación de turbinas eólicas. Desarrolla un "asistente robótico móvil" que ayuda en el ensamblaje de componentes gigantes y permite al humano interactuar con el robot a través de un smartwatch.

Automotriz: Además de la soldadura de chasis, se utilizan en estaciones de soldadura por vibración para piezas plásticas, permitiendo que el operario se enfoque en tareas de control de calidad mientras el robot realiza el trabajo monótono (Polonara, M. *et al.*, 2024).

Manufactura de Equipos Médicos y del Hogar: Se reportan casos de éxito en la soldadura de marcos de puertas metálicas y componentes biomédicos mediante la integración de cobots en líneas de producción flexibles (Arvola, M. *et al.*, 2021; Kakade, S. *et al.*, 2023).

Por otra parte, la literatura técnica resalta beneficios específicos que impactan tanto en la rentabilidad como en el bienestar del trabajador:

Reducción de desviaciones: El uso de marcos de trabajo basados en Digital Twins ha permitido reducir desviaciones máximas en la costura de 2.9 mm a menos de 0.2 mm (Chaiprabha, K. *et al.*, 2025)

Uniformidad: Los cobots mantienen constantes la velocidad, el ángulo de la antorcha y la longitud del arco durante todo el turno, eliminando el "pulso inestable" del humano (Crawford, M. L *et al.*, 2025; Kakade, S. *et al.*,2023)

Reducción de defectos: En la fabricación de tanques industriales, la automatización redujo la tasa de defectos de un 3-5% (promedio manual) a rangos de 0.07% a 0.16% (Crawford, M. L. *et al.*, 2026).

Además, los aportes en salud y seguridad son unas de las ventajas sociales más importantes de los cobots:

Riesgos Respiratorios: La soldadura manual expone al trabajador a humos tóxicos que pueden causar asma, bronquitis crónica y siderosis. El cobot permite que el operario se mantenga alejado de la "pluma de humo" (Stewart, J, 2025).

Protección contra Radiación y Calor: Evita la exposición directa a la radiación ultravioleta intensa y a las altas temperaturas, previniendo quemaduras cutáneas y fatiga ocular (Tannous, M. *et al.*, 2020; Liu, H. Y. *et al.*, 2026).

Ergonomía: El cobot asume posturas extenuantes (como soldaduras por encima de la cabeza), reduciendo las lesiones musculoesqueléticas en cuello y hombros (Malakmohamadi, S, 2025; Schumacher, S, et al., 2022).

Evita fatiga física y mental: Calzavara, M. *et al.*, (2023). Aporta una visión de la Industria 5.0, donde el objetivo no es solo la productividad, sino el bienestar del trabajador. Propone un modelo para asignar tareas al cobot basándose en la reducción de la fatiga física y la carga mental del operario humano.

Es de destacar que la mencionada tecnología aparte de traer ventajas en la salud de los trabajadores también produce un alto incremento de la productividad y rentabilidad, en aspectos como:

Velocidad de ejecución: Se ha documentado que los sistemas colaborativos operan a velocidades tres veces superiores a las manuales (Crawford, M. L. *et al.*, 2026), por su parte

Manzanares Vega, C. F. (2022) Evalúa la productividad y calidad en procesos de ensamblaje de cuatro piezas, comparando configuraciones guiadas por cámara versus coordenadas. Es interesante porque analiza cómo la velocidad del robot afecta directamente la tasa de éxito de la tarea.

Rendimiento diario: Un caso de estudio reportó un incremento de 15 metros lineales de soldadura al día a 82 metros lineales tras implementar cobots (un aumento del 446%) (Crawford, M. L. *et al.*, 2026).

ROI (Retorno de Inversión): Los sistemas colaborativos pueden ser entre un 25% y 40% más económicos que las celdas robóticas tradicionales si se consideran los costos de instalación, vallas de seguridad y programación Campbell, J. *et al.*, 2020)

También es de destacar que estas nuevas tecnologías, han impulsado otras tecnologías que trabajan muy bien en conjunto, por ejemplo:

Detección Háptica: Algoritmos basados en aprendizaje automático permiten que el robot detecte el "toque" con la pieza de trabajo con una precisión del 99.9%, guiando al operario en tiempo real (Tannous, M. *et al.*, 2020).

Inteligencia Artificial y Visión: Se integran cámaras CMOS y algoritmos de procesamiento de imágenes para monitorear el charco de soldadura (molten pool) y detectar porosidad o grietas mientras se está soldando (Tannous, M. *et al* 2026; Maculotti, G. *et al.*, 2025). Ninkovic, V. *et al.*, Destaca por proponer una soldadura colaborativa impulsada por Inteligencia Artificial, utilizando visión por computadora avanzada para el ajuste dinámico de parámetros y la detección de defectos en tiempo real. Por su parte Zheng, J, *et al.*, (2025), utiliza aprendizaje por refuerzo (IA) para optimizar la programación de tareas de remachado y soldadura, validando las estrategias en una plataforma de gemelo digital para reducir costos de

prueba y error. (Wang, J., *et al.*, 2023) es la base técnica para entender cómo la Inteligencia Artificial y la visión computacional permiten que los robots de soldadura dejen de ser máquinas "ciegas" que solo siguen una ruta programada y se conviertan en sistemas capaces de adaptarse a las variaciones de la pieza en tiempo real

Proyectos como MyWelder transforman al soldador manual en un "campeón del cobot", permitiéndole supervisar hasta tres robots simultáneamente y enfocarse en tareas de mayor valor añadido (Ferraguti, F. *et al.*, 2023; Crawford, M. L. *et al.*, 2026).

MQTT: García, C. A. *et al.*, (2020) Propone una arquitectura basada en el protocolo MQTT y bloques de funciones (IEC-61499) para controlar el sistema de soldadura, lo que permite una comunicación ligera y rápida entre la capa física y la cibernética.

La robótica colaborativa representa un cambio fundamental en la industria moderna, marcando el paso definitivo hacia la era de la Industria 5.0. En este nuevo paradigma, el objetivo principal ha dejado de ser únicamente el aumento de la productividad para centrarse en el bienestar del trabajador y la sostenibilidad. Los cobots se diseñan ahora bajo un enfoque centrado en el humano, asumiendo las tareas más extenuantes, repetitivas o peligrosas para reducir la fatiga física y la carga mental de los operarios, logrando un equilibrio armonioso entre la precisión mecánica y la flexibilidad humana.

El avance hacia la autonomía técnica es otro de los pilares más destacados. Gracias a la integración de inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje por refuerzo, estos sistemas ya no requieren una programación rígida. Ahora son capaces de auto organizarse en equipos de robots heterogéneos, coordinar sus movimientos para evitar colisiones de forma dinámica y tomar decisiones en tiempo real sobre la distribución de la carga de trabajo. Esto permite que los sistemas de soldadura y ensamblaje se adapten por sí solos a cambios en la geometría de las

piezas o en el entorno de trabajo.

Fase 2 Caracterización Técnica del FANUC CRX-25iA y del Entorno de Aplicación CHEC

Figura 30

Cobot



Nota: Imagen del Cobot con el cual se cuenta en el Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026

La central hidroeléctrica de caldas CHEC fue fundada el 26 de febrero de 1944 gracias a los aportes de la nación, el municipio y departamento. Desde entonces, se ha consolidado como una empresa clave en la generación y distribución de energía eléctrica en los departamentos de caldas y Risaralda. Sus plantas se clasifican en dos grupos: las plantas menores como son planta sancancio, intermedia, municipal. Se llaman menores por que generan menos de 20 Mw.

También existen unas plantas mayores que son ínsula, esmeralda y san Francisco, que superan los 20 Mw de capacidad instalada.

En paralelo a su desarrollo energético, CHEC fortaleció su infraestructura técnica con talleres mecánicos que inicialmente se dedicaban al mantenimiento y mecanizado de equipos para garantizar la disponibilidad de las centrales. Con el paso del tiempo, estos talleres evolucionaron hasta convertirse en el actual Taller de Alta Ingeniería, especializado en la

reparación, fabricación y rehabilitación de componentes esenciales como rodetes Francis y Pelton, compuertas y estructuras hidromecánicas. Entre 2023 y 2024, la empresa emprendió una transformación profunda de este taller, invirtiendo cerca de \$3.000 millones en maquinaria avanzada: centro mecanizado, torno vertical de gran capacidad, equipos de soldadura robotizada, herramientas de corte y plasma, hornos de tratamiento térmico y estación de Termorociado. Gracias a esta modernización, CHEC amplió sus servicios de mecanizado, fabricación y reparación de piezas metalmecánicas, reduciendo la dependencia de terceros y ofreciendo soluciones al mercado nacional e internacional.

Dentro de esta estrategia de modernización, CHEC incorporó el robot colaborativo FANUC CRX-25iA, un equipo de última generación diseñado para trabajar de forma segura en entornos industriales. Este modelo, perteneciente a la familia CRX de FANUC, se distingue por su capacidad de carga útil de 25-30kg, un alcance máximo de 1889mm, y una Repetibilidad de ± 0.05 mm, lo que garantiza precisión en procesos críticos como soldadura, ensamble y manipulación de piezas. Con un peso de 135kg, un controlador R-30iB Plus Mini y la posibilidad de montaje en distintas configuraciones, el CRX-25iA ofrece gran versatilidad. Además, su interfaz táctil intuitiva facilita la programación incluso para personal sin experiencia previa en robótica. En modo colaborativo alcanza velocidades de hasta 1000 mm/s, mientras que en modo de alta velocidad puede llegar a 2000 mm/s, siempre bajo estrictas evaluaciones de seguridad.

Las aplicaciones más comunes del CRX-25iA incluyen la soldadura MIG/MAG y TIG, la carga y descarga de piezas, el ensamble de componentes voluminosos en sectores automotrices y metalmecánicos, así como procesos de fabricación aditiva y dispensada de adhesivos. Entre sus principales ventajas destacan la alta capacidad de carga, la facilidad de programación, la

seguridad colaborativa sin necesidad de cercas de protección (dependiendo de la evaluación de riesgos) y un mantenimiento reducido gracias a la confiabilidad característica de FANUC.

CHEC ha pasado de ser una empresa dedicada exclusivamente a la generación eléctrica a convertirse en un referente de innovación tecnológica e ingeniería avanzada. La creación del Taller de Alta Ingeniería y la incorporación de tecnologías como el robot FANUC CRX25iA reflejan su compromiso con la eficiencia, la competitividad y la expansión hacia mercados internacionales, consolidando su papel como motor de desarrollo regional y nacional.

Tabla 11

Características y Especificaciones del Robot FANUC CRX-25iA

Característica	Especificación
Modelo	FANUC CRX-25iA
Tipo	Robot colaborativo de 6 ejes
Carga útil máxima	25 (30 kg en modo especial, con restricciones de espacio)
Alcance máximo	1.889mm
Repetibilidad	±0.05 mm
Peso del cobot	135 kg
Controlador	R-30iB Plus (mini plus)
Fuente alimentación	200-240V, 50-60 Hz, monofásico o trifásico
Montaje	Piso, invertido o en ángulo
Interfaz programación	Tablet TP táctil, programación intuitiva
Modos de operación	Colaborativo (seguro al trabajar con humanos) y alta velocidad (con resguardos)
Aplicaciones comunes	Soldadura ligera (MIG/MAG, TIG), ensamblaje, Manipulación de

Característica	Especificación
	materiales, dispensado, fabricación aditiva.

Nota. Esta tabla nos muestra las Características y especificaciones del robot FANUC CRX-25iA.

El FANUC CRX25-iA presenta características técnicas que lo hacen adecuado para el taller de alta ingeniería de la CHEC, especialmente en tareas de manipulación, inspección y pruebas de componentes medianos. Aunque su diseño colaborativo favorece la interacción segura en múltiples procesos, la aplicación en soldadura por arco requiere una reclasificación hacia un entorno industrial protegido, con medidas adicionales de seguridad y protección. No obstante, desde el punto de vista técnico, el CRX-25iA es viable siempre que garantice la integración con fuentes de soldadura y periféricos industriales.

Figura 31*Cobot Colaborativo*

Nota. Foto del robot FANUC con el cual se cuenta en el Taller de Alta Ingeniería en CHEC 2026. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

CHEC, empresa del sector energético con más de 75 años en el mercado, ha desarrollado la capacidad para la administración, operación y mantenimiento de sus propias centrales de Generación. Está compuesta por centrales hidráulicas y térmicas con diferentes configuraciones de turbinas y capacidades instaladas, tal como se resume en la Tabla 2.

Tabla 12*Infraestructura de Generación Atendida por CHEC*

Central	Tipo de generación	Tipo de turbina	Cantidad	Capacidad unitaria (MW)	Capacidad instalada aproximada (MW)
San Francisco	Hidráulica	Francis	3	45	135
Esmeralda	Hidráulica	Francis	2	15	30
Ínsula	Hidráulica	Francis	2	7,5	15
ínsula	Hidráulica	Francis	1	12	12
Municipal	Hidráulica	Francis	2	1	2
Intermedia	Hidráulica	Francis	1	1	1
Cansancio	Hidráulica	Francis	1	1	1
Cansancio	Hidráulica	Francis	1	1,2	1,2
Guajaca	Hidráulica	Francis	1	1	1
Termo dorada	Térmica	Aero derivada PWPS	2	25	50

Nota. Esta tabla nos muestra la Infraestructura de generación atendida por CHEC.

Capacidades Técnicas del Taller

El Taller de Alta Ingeniería de la CHEC dispone de una infraestructura metalmecánica especializada orientada al mantenimiento y recuperación de componentes críticos de generación

hidráulica. La Tabla 3 resume las principales capacidades técnicas instaladas y la figura 1 muestra los servicios del taller.

Tabla 13

Capacidades Técnicas Instaladas

Área de proceso	Equipamiento/servicio	Capacidad técnica instalada
Mecanizado pesado	Torno vertical	Copa de 3,2m. Y 25 tones. De carga.
	Centro de mecanizado 4 ejes	2 tones. Y bancada de 1,8m.
	Tornos y fresas convencionales	
Soldadura especializada	Reparación de componentes de turbina	Rodetes, liners, álabes, ejes, laberintos
	Soldaduras especiales	Fundición nodular y gris, cobre, bronce, aluminio, acero inoxidable
Tratamientos térmicos	Horno eléctrico	Capacidad de 2,2m de diámetro x 3m de alto y temperatura hasta 1000°C.
Metalización	Termorociado	Recubrimientos de Fe-Cr en componentes de turbina con dureza de 49 a52 HRC
Corte y conformado	Corte por plasma	Capacidad de corte Hasta 1 1/4".
	Rolado de láminas	1,5m de ancho, M diámetros mayores a 0,3m y espesores de

Área de proceso	Equipamiento/servicio	Capacidad técnica instalada
		hasta 3/4 En acero inoxidable Y 5 / 8 en acero al carbón.
	Cizalla universal	Corte, troquelado y destalonado de materiales.
Ensayos no destrutivos	Inspección visual, tintas penetrantes, partículas magnéticas, ultrasonido, dureza	
Prensa hidráulica	Servicio de prensado	Capacidad de 150ton. Altura de 2,5m y Ancho de 1,5m.
Arenado	Sandblasting	Granalla de acero
Remontajes	Turbinas Francis	Ajuste de holguras y sellos

Nota. Esta tabla nos muestra las capacidades técnicas instaladas.

Figura 32*Taller Alta Ingeniería CHEC 2026*

Nota. Imágenes de taller de Alta Ingeniería CHEC y sus diferentes fuentes de trabajo. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Descripción del entorno CHEC: La central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Perteneciente al Grupo EPM, es una empresa dedicada a la generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en la región de Caldas, Colombia. Su entorno se caracteriza por una infraestructura energética compleja que incluye plantas eléctricas, subestaciones y redes de distribución, todas ellas sometidas a procesos de mantenimiento continuo para garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico.

Los talleres de mantenimiento desempeñan un papel fundamental, ya que se realizan reparaciones de turbinas, válvulas, sistemas eléctricos y estructuras metálicas. Estas actividades requieren procesos de soldadura y mecanizado de alta precisión, así como la manipulación de piezas pesadas que superan los 20-25 kg.

El entorno CHEC también enfrenta retos significativos relacionados con la seguridad Laboral, la eficiencia operativa y la modernización tecnológica. La manipulación manual de

cargas pesadas y la exposición a procesos de soldadura implican riesgos ergonómicos y de seguridad que pueden mitigarse mediante la automatización colaborativa.

Entorno de aplicación en CHEC y variables técnicas: En CHEC constituye el marco de integración de los robots colaborativos en procesos industriales. Garantizando que la interacción humano-robot se realice bajo condiciones seguras y eficientes. En este entorno se definen las variables técnicas que regulan la operación del robot y su interacción con el operario, asegurando cumplimiento de normativas internacionales como la ISTS 15066, que establece límites de fuerza, presión y energía cinética permitida en aplicaciones colaborativas.

Las principales variables técnicas del COBOT en CHEC son:

Velocidad de movimiento: ajustada según evaluación de riesgos, limitando la aceleración y velocidad máxima del cobot para evitar incidentes.

Fuerza y presión de contacto: reguladas para garantizar que cualquier interacción física con el operario no supere los umbrales de seguridad establecidos.

Carga útil efectiva: aunque el FANUC soporta hasta 25 kg, el de CHEC ajusta este valor según la herramienta instalada y el tipo de proceso (FANUC, 2024)

Tiempo de parada y respuesta: el sistema debe garantizar tiempos mínimos de reacción ante contacto inesperado o emergencia.

Carga útil efectiva: aunque el FANUC CRX-25iA soporta hasta 25 kg, el CHEC ajusta este valor según la herramienta instalada y el tipo de proceso (FANUC, 2024).

Configuración digital del entorno: parámetros de red, protocolos de comunicación (Ethernet/IP, PROFINET, OPC-UA) e integración con PLCs y sistemas MES.

Consumo energético: Dependiente del ciclo de trabajo y del controlador R-30iB plus, optimizado para eficiencia en aplicaciones colaborativas.

Interacción humano- robot: Definida por límites normativos que aseguran un trabajo conjunto seguro y productivo.

Tabla 14

Descripción de las Variables Técnicas en CHEC

Variable Técnica.	Descripción en CHEC
Velocidad	Ajusta según riesgos y normativa ISO/TS 15066
Fuerza de contacto	Limitada para evitar daños en interacción humano-robot
Carga útil efectiva	Depende de herramienta y modo de operación
Zona segura	Delimitación especial con sensores y barreras virtuales
Tiempo de parada	Reacción inmediata ante contacto o emergencia
Configuración digital	Protocolos de comunicación e integración con sistemas industriales
Consumo energético	Optimizado según ciclo de trabajo y controlador

Nota. Esta tabla nos muestra la Descripción de las variables técnicas en CHEC.

Principales Equipos Manejados en el Taller Alta Ingeniería CHEC

Figura 33

Unidad Alta Ingeniería CHEC 2026



Figura 34*Centro Mecanizado CHEC 2026*

CENTRO DE MECANIZADO HCMC 1682	
Eje X, longitudinal:	1600 mm
Eje Y, transversal:	820 mm
Eje Z, vertical:	840 mm
Husillo:	SK50 / 38kW / 979Nm / 6000rpm
Cambiador de herramientas:	32
Control:	Heidenhain, TNC640

Unidad de Alta Ingeniería | cbec

Nota. Imagen del centro mecanizado del Taller de Alta Ingeniería CHEC. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Figura 35*Servicios y Capacidades Técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026*

TORNO VERTICAL SK2	
Diámetro de la copa	3200 mm
carga máxima	25 toneladas
espacio entre puente y copa	2000 mm



TORNO VERTICAL BULLARD	
Voltaje sobre columna y copa	1820 mm
Elevación del puente	1780 mm
Espacio entre columnas	2100 mm

Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Figura 36

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Figura 37

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



LATIDRO PARABO	
Tipo de trabajo	simple
tamaño de la mesa	550 mm
tamaño de columna	380 mm
controlado por	variador de velocidad y potenciómetro
distancia entre mesa y columna	445 mm



LATIDRO IMICO	
Tipo de trabajo	realiz
tamaño de la mesa	520 mm
capacidad de la prensa	90 mm
tamaño de columna	750 mm
controlado por	potencia
capacidad del mandril	3/4"
espacio entre mandril y columna	450 mm



LATIDRO REXON	
Tipo de trabajo	simple
tamaño de la mesa	520 mm
capacidad de la prensa	90 mm
tamaño de columna	700 mm
controlado por	potencia
espacio entre mandril y columna	200 mm
capacidad del mandril	3/8 mm (3/4")

Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Esta metodológica consistió en la caracterización técnica del FANUC CRX-25iA, con el propósito de identificar sus especificaciones funcionales, capacidades operativas y compatibilidad con procesos de soldadura industrial en el contexto del Taller de Alta Ingeniería de la CHEC.

Para ello se realizó un análisis detallado de la documentación oficial del fabricante, incluyendo manuales de especificaciones técnicas y catálogos de producto. Según FANUC, el CRX25-iA cuenta con una capacidad de carga de 25 kg, un alcance de 1889mm, seis ejes, repetitividad de $\pm 0.04-0.05$ mm y clasificación IP67 en el brazo. Además de sistemas de seguridad colaborativa integrados. Estas características lo ubican dentro de la categoría cobots de media-alta capacidad, aptos para manipular herramientas de soldadura y componentes de tamaño medio.

Posteriormente, se contrastaron las especificaciones técnicas del CRX25-iA con los requerimientos operativos identificados en el taller de alta ingeniería de CHEC, siguiendo criterios de evaluación tecnológica y adecuación tarea-sistemas descritos en la literatura sobre automatización industrial. El análisis comparativo evidenció que la capacidad de carga y el alcance extendido del robot lo hacen técnicamente viable para manipular antorchas de soldadura y operar sobre piezas medianas, mientras que su repetitividad contribuye a la estandarización del proceso. Así mismo, su diseño colaborativo favorece la interacción segura con el propósito en tareas de ajuste, inspección y supervisión, aunque la soldadura por arco exige condiciones de seguridad adicionales.

En el taller de Alta Ingeniería de la CHEC se trabajan especialmente bastidores metálicos, soportes estructurales, bridas de unión, componentes de tubería y placas de refuerzo, con rangos de peso entre 5 y 20 kg por pieza individual y conjuntos que pueden superar los

rangos de 50-80 kg. Las dimensiones típicas de los componentes oscilan entre .5v7 1.5 m de longitud con espesores de 3-12 mm en acero al carbono y acero inoxidable. Las posiciones de soldadura más frecuentes son planas (1G/PA) y horizontal (2G/PC), aunque en reparaciones y ensamblajes complejos se emplean posiciones verticales ascendente (3G/PF) y sobrecabeza (4G/PE) (AWS, 2020). La viabilidad posicional es moderada, controlada mediante fijaciones y posicionadores, pero requiere flexibilidad para adaptarse a geometrías diversas.

Figura 38

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

El taller dispone de posicionadores rotativos y basculantes Koike Aronson, con capacidad de carga de hasta 250kg, empleados en piezas cilíndricas y bastidores, así como mesas de soldadura modular Siegmund para fijación de componentes planos y medianos. En cuanto a fuentes de soldadura, se utilizan Lincoln Electric Power Ware para procesos MIG/ MAG pulsados, Miller Dynasty TIG series para soldaduras GTAW en ACESO INIXIDABLE Y Esab Warrior 400i CC/CV para procesos SWAW y MIG convencionales. Estos equipos permiten la integración con el cobot mediante I/O estándar y sincronización con periféricos industriales.

Figura 39

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Los procesos predominantes en el taller son la soldadura MIG/MAG (GMAW), por su productividad y facilidad de automatización; la soldadura TIG (GTAW), aplicada en piezas de acero inoxidable y componentes que requieren alta calidad superficial; y la soldadura SMAW (Manual Shielded Metal Arc Welding), aun presente en reparaciones y trabajos puntales, aunque no constituye el objetivo principal de automatización (AWS, 2020; Lincoln Electric, 2021). El FANUC CRX-25iA, con su alcance de 1889mm y repetitividad de ± 0.05 mm, puede cubrir la mayoría de las posiciones requeridas en el taller, siempre que se empleen fijaciones modulares y posicionadores para piezas de geometría irregular.

Figura 40

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

La siguiente síntesis muestra la relación entre las características del CRX25-iA y los requisitos específicos de procesos de soldadura industrial:

Tabla 15

Aspectos, Requisitos y Evaluaciones del Robot CRX-25iA

Aspecto	CRX-25iA (cobot)	Requisitos para soldadura	Evaluación
Tipo de aplicación	Cobot colaborativo bajo ISO /TS15066	La soldadura NO se considera colaborativa por riesgo de arco y calor.	No puede operar en modo colaborativo durante soldadura
Normativa de seguridad	Cumple ISO/TS15066	Soldadura requiere ISO10218-1/2:2025 con controles más estrictos.	Aplicación reclasificada como Industrial protegida.
Interacción humano-	contacto permitido	la soldadura excede	Se requieren barreras

Aspecto	CRX-25iA (cobot)	Requisitos para soldadura	Evaluación
robot	bajo límites de fuerza y presión ISO/TS15066	todos los límites de fuerza, Presión y Energía por arco.	físicas, cortina o celdas de seguridad
Protección mecánica del robot	IP/67 (polvo/ agua)	soldadura exige protección contra chispas radiación salpicaduras calientes	Necesita fundas térmicas y protecciones adicionales.
Precisión y capacidad	± 0.05 mm y 25 kg	Adecuado para sostener antorchas MIG/ /TIG.	viable técnicamente para cordones estándar
Integración con equipo	I/O y RS-485 integrados	Soldadura requiere comunicación con fuentes Lincoln, Miller, Esab.	Necesita verificar compatibilidad con la fuente soldadora.
Tipo de piezas	Bastidores, Soportes, bridas, Tuberías.	Piezas de 5 a 20 kg, conjuntos hasta 70 kg.	Dentro de la capacidad Del cobot.
Posiciones de soldadura	Plana, horizontal, ocasional vertical y sobrecabeza	Variabilidad moderada	Cobertura completa con programación adecuada.
Posicionadores	Rotativos Koike Aronson, mesas Siegmund	Recomendados par Cordones largos y Piezas cilíndricas.	Integrables con el cobot.

Nota. Esta tabla nos muestra la Aspectos, requisitos y evaluaciones del robot CRX-25iA.

Figura 41

Taller de Alta Ingeniería CHEC 2026



Nota. Servicios y capacidades técnicas del Taller de Alta Ingeniería – CHEC 2026

Fase 3 Relación Capacidad–Tarea y Determinación de Escenarios de Aplicación

La tercera fase metodológica se orientó a evaluar la viabilidad conceptual de implementar el robot colaborativo FANUC CRX-25iA en los procesos de soldadura del Taller de Alta Ingeniería (CHEC), considerando criterios técnicos, operativos, de seguridad y organizacionales. Se realizó una revisión descriptiva del entorno productivo, identificando actividades metalmeccánicas críticas; reparación de rodets, recuperación de alabes, soldadura de ejes, laberintos y componentes estructurales de turbinas hidráulicas. El análisis permitió reconocer características relevantes como la alta variabilidad geométrica de las piezas y la necesidad de precisión estructural en componentes críticos del sistema de generación eléctrica.

Este tipo de entorno productivo se alinea con lo descrito en la literatura sobre sistemas de manufactura reconfigurable e inteligente, donde la diversidad geométrica y la necesidad de adaptabilidad requieren soluciones tecnológicas flexibles. Así mismo la integración de

tecnologías avanzadas en entornos industriales estratégicos es coherente con los principios de la industria, orientados a mejorar eficiencia, confiabilidad y control del proceso.

Posteriormente, se estableció una relación directa entre las tareas críticas del taller y las capacidades técnicas del robot colaborativo, a partir de las especificaciones proporcionadas. Y siguiendo criterios de asignación funcional en entornos de colaboración humano-robot descritos en la literatura especializada.

Tabla 16

Relación Directa Tarea-Capacidad del Robot Colaborativo

Tarea del taller	Capacidad del Cobot	Correspondencia
Cordones repetitivos en reparación de superficies	Alta repetitividad	Alta
Manipulación de antorchas y accesorios	Capacidad de carga de 25 kg	Adecuada
Intervenciones en piezas medianas	Alcance de 1.889 mm	Adecuada
Trabajo en entorno compartido	Sensores de fuerza y limitación de potencia	Compatible
Variabilidad geométrica	Programación flexible	Media–Alta

Nota. Esta tabla nos muestra la Relación directa tarea-capacidad del robot colaborativo.

Este análisis facilita determinar el grado de compatibilidad entre las exigencias productivas del entorno industrial y las capacidades del cobot, conforme a los fundamentos de seguridad física e integración estratégica de funciones en entornos HRC.

Evaluación y Viabilidad

Viabilidad del taller de Alta Ingeniería: El taller es viable para la integración del robot colaborativo, dado que cuenta con infraestructura moderna, procesos metalmecánicos y un entorno alineado con la industria.

Adecuación para CHEC: La incorporación del cobot es adecuada para CHEC, pues fortalece su autonomía tecnológica, reduce dependencia de terceros y amplía su capacidad de ofrecer servicios externos.

Necesidad de reclasificación: El taller requiere una reclasificación funcional como unidad estratégica de innovación y manufactura avanzada, más allá de un taller de mantenimiento, dado su rol amplio en el mercado nacional e internacional.

Operación en modo colaborativo: El FANUC CRX-25iA puede operar en modo colaborativo de manera segura, gracias a sus sensores de fuerza, limitación de potencias y programación flexible, lo que permite interacción directa con operarios en tareas de soldadura y mecanizado.

El taller de Alta Ingeniería de CHEC es un entorno viable, adecuado y estratégico para la implementación del robot colaborativo FANUC CRX-25iA, con potencial de reclasificación hacia un centro de manufactura avanzada y operación segura en modo colaborativo, en coherencia con los principios de la industria y la literatura especializada.

Con base en la información recopilada, la factibilidad de implementación se evaluó bajo tres dimensiones:

Factibilidad Técnica y Operacional

Se determinó que el FANUC CRX-25iA cumple con los parámetros básicos requeridos para aplicaciones de soldadura colaborativa en componentes medianos, considerando su

capacidad de carga, alcance y repetitividad. Estas características coinciden con los criterios técnicos señalados en estudios sobre adopción de cobots en procesos de soldadura industrial. No obstante, la literatura también advierte que la implementación efectiva de robots colaborativos requiere evaluación de aspectos como la integración con fuentes de soldadura existentes, adecuación de posicionadores y validación de precisión en aplicaciones de tolerancia crítica.

Factibilidad en Seguridad

El entorno actual presenta riesgos ergonómicos y de exposición térmica propia de la soldadura manual, tales como radiación del arco eléctrico, inhalación de humos metálicos y posturas forzadas prolongadas. En este contexto, la incorporación de un sistema colaborativo puede contribuir a reducir la exposición directa al arco eléctrico, disminuir la carga biomecánica asociada a movimientos repetitivos y mejorar la distribución del esfuerzo físico entre el operario y el robot. Estas mejoras son coherentes con los principios de interacción humano-robot seguro establecidos en la norma ISO 10218-1 (2011) y en la especificación técnica ISO/TS 15066 (2016), las cuales regulan los modos de colaboración y los límites de fuerza y potencia en entornos compartidos. Asimismo, estudios recientes en colaboración humano-robot destacan que la implementación adecuada de cobots puede reducir riesgos ergonómicos y fortalecer la seguridad operativa cuando se realiza bajo un análisis estructurado de riesgos.

Factibilidad Organizacional

La CHEC cuenta con experiencia técnica consolidada en mantenimiento y reparación de turbinas, lo cual constituye una base favorable para la adopción de nuevas tecnologías. No obstante, la incorporación de robótica colaborativa implicaría procesos de gestión del cambio organizacional, sensibilización del personal frente a la automatización y alineación con estrategias de modernización tecnológica. La literatura sobre colaboración humano-robot en el

marco de la industria 5.0 señala que la implementación exitosa de cobots requiere no solo viabilidad técnica, sino también adaptación cultural, formación continua y participación del trabajador en el proceso de transformación tecnológica. Asimismo, el concepto de “operador inteligente” en la industria 4.0 resalta la importancia de integrar capacidades humanas y tecnológicas mediante estrategias organizacionales estructuradas.

Técnicas de Análisis

El análisis de la información recopilada se realizó mediante un enfoque cualitativo–descriptivo, apoyado en tres técnicas principales: análisis documental, análisis comparativo y categorización temática. Estas técnicas permitieron integrar la revisión de literatura científica con la caracterización técnica del robot y las condiciones del entorno de aplicación en el Taller de Alta Ingeniería de la CHEC.

En primer lugar, se efectuó un análisis documental sistematizado de fuentes científicas, normativas técnicas y documentación oficial del fabricante del robot colaborativo FANUC CRX-25iA. Este procedimiento incluyó la lectura comprensiva, la extracción de información relevante y la organización de los datos en matrices de síntesis, con el fin de identificar criterios técnicos aplicables a procesos de soldadura industrial.

En segundo lugar, se desarrolló un análisis comparativo orientado a contrastar las capacidades técnicas del robot (alcance, capacidad de carga, repetitividad, protección y características de seguridad) con los requerimientos específicos de las tareas de soldadura realizadas en el taller. Este contraste permitió evaluar el grado de correspondencia entre variables técnicas del sistema robótico y exigencias operativas del entorno productivo.

Como herramienta de apoyo, se elaboró una matriz de correspondencia capacidad–tarea, mediante la cual se identificaron coincidencias técnicas, posibles escenarios de aplicación y

restricciones estructurales. Esta técnica facilitó la organización sistemática de la información y permitió fundamentar la determinación de aplicaciones potenciales y limitaciones técnicas.

Finalmente, se aplicó una categorización temática, organizando los hallazgos en tres dimensiones analíticas previamente definidas: eficiencia, seguridad y calidad. Este procedimiento permitió estructurar los resultados de manera coherente con los criterios identificados en la revisión de literatura.

La integración de estas técnicas permitió desarrollar un análisis técnico–conceptual orientado a establecer relaciones entre capacidades del robot y tareas de soldadura, en coherencia con los objetivos del estudio.

Limitaciones del Estudio

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cualitativo y documental, por lo que no se realizaron pruebas experimentales ni validaciones prácticas del robot en condiciones reales de operación dentro del Taller de Alta Ingeniería de la CHEC. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden a un análisis técnico–conceptual basado en información secundaria y no a una implementación piloto o verificación empírica.

Asimismo, no se efectuaron mediciones directas de parámetros reales de soldadura, tales como tiempos de ciclo, trayectorias programadas, estabilidad del arco, consumo energético o niveles de retrabajos. El análisis del entorno productivo se fundamentó en descripciones generales de las actividades del taller, sin acceso a registros técnicos internos detallados.

Tampoco se realizó una evaluación económica cuantitativa que incluyera análisis de costos de integración, retorno de inversión, mantenimiento o impacto financiero comparativo frente a otras alternativas tecnológicas. Por lo tanto, el estudio no permite establecer conclusiones económicas definitivas.

Adicionalmente, la información utilizada proviene de literatura científica, documentación técnica del fabricante y experiencias reportadas en otros contextos industriales, lo que implica que las condiciones específicas del entorno CHEC podrían generar variaciones en la aplicabilidad real del sistema.

En este sentido, los resultados deben interpretarse como una aproximación técnica fundamentada que identifica escenarios potenciales de aplicación y restricciones estructurales, sirviendo como base para futuras evaluaciones experimentales o estudios piloto de implementación.

Resultados

Robótica Colaborativa (COBOTS)

Que es un cobot (robot colaborativo): Es un tipo de robot diseñado para interactuar físicamente con humanos en un entorno de trabajo colaborativo. A diferencia de los robots industriales tradicionales, los cobots están diseñados para trabajar junto a los humanos, optimizando su eficiencia y reduciendo el riesgo de accidentes laborales.

Figura 42

Quemaduras de Soldaduras



Nota. En la imagen se muestra una quemadura producida por una soldadura. Tomado de Common Welding Defects: Cause & How to Fix Them. Jeef Grill (2024).

<https://newindscorp.com/common-welding-defects-cause-how-to-fix-them/>

La incorporación del Cobot colaborativo FANUC en el taller de alta ingeniería de CHEC permitirá modernizar los procesos de soldadura y reparación de equipos energéticos, generando impactos tangibles en productividad, seguridad y sostenibilidad.

La implementación del FANUC consolidaría al taller de Alta Ingeniería de CHEC como

un referente regional en la aplicación de robótica colaborativa para mantenimiento industrial, demostrando que la convergencia entre humanos y cobots no solo incrementaría la eficiencia operativa, sino que también fortalecería la seguridad y la sostenibilidad de los procesos energéticos.

Aplicaciones de Cobots en Procesos de Soldadura Industrial

La presente monografía muestra que los robots colaborativos (cobots) están siendo incorporados de manera creciente en procesos de soldadura industrial, especialmente en tareas que requieren repetitividad, estabilidad del cordón y adaptación a geometrías variables.

Diversos estudios técnicos y científicos como los realizados por SciELO Ecuador (salimbeni & Mamani, 2020), Aplicaciones Industriales (empresa de manufactura avanzada), Universidad de Valladolid España (Sanz moro 2021) reportan que en uso de cobots permite reducir la variabilidad del proceso asociada al cansancio del operario y mejorar la uniformidad del cordón, lo que contribuye a una mayor calidad estructural en componentes críticos. Así mismo se señala que la soldadura colaborativa disminuye retrasos y tiempos de ciclo, ya que el robot mantiene trayectorias constantes mientras el operario supervisa o ajusta el proceso

Sin embargo, la literatura también señala limitaciones técnicas, principalmente relacionadas con la precisión comparativa frente a robots industriales rígidos y con la programación en entornos de alta variabilidad geométrica o tolerancias muy exigentes. A pesar de ello, los estudios coinciden en que los cobots resultan especialmente útiles en tareas de mantenimiento y reparación, donde no se trabaja en grandes series y se requiere flexibilidad operativa. Esto los convierte en una alternativa tecnológica relevante para entornos metalmecánicos con diversidad de piezas y procesos no estandarizados. (FANUC, 2025).

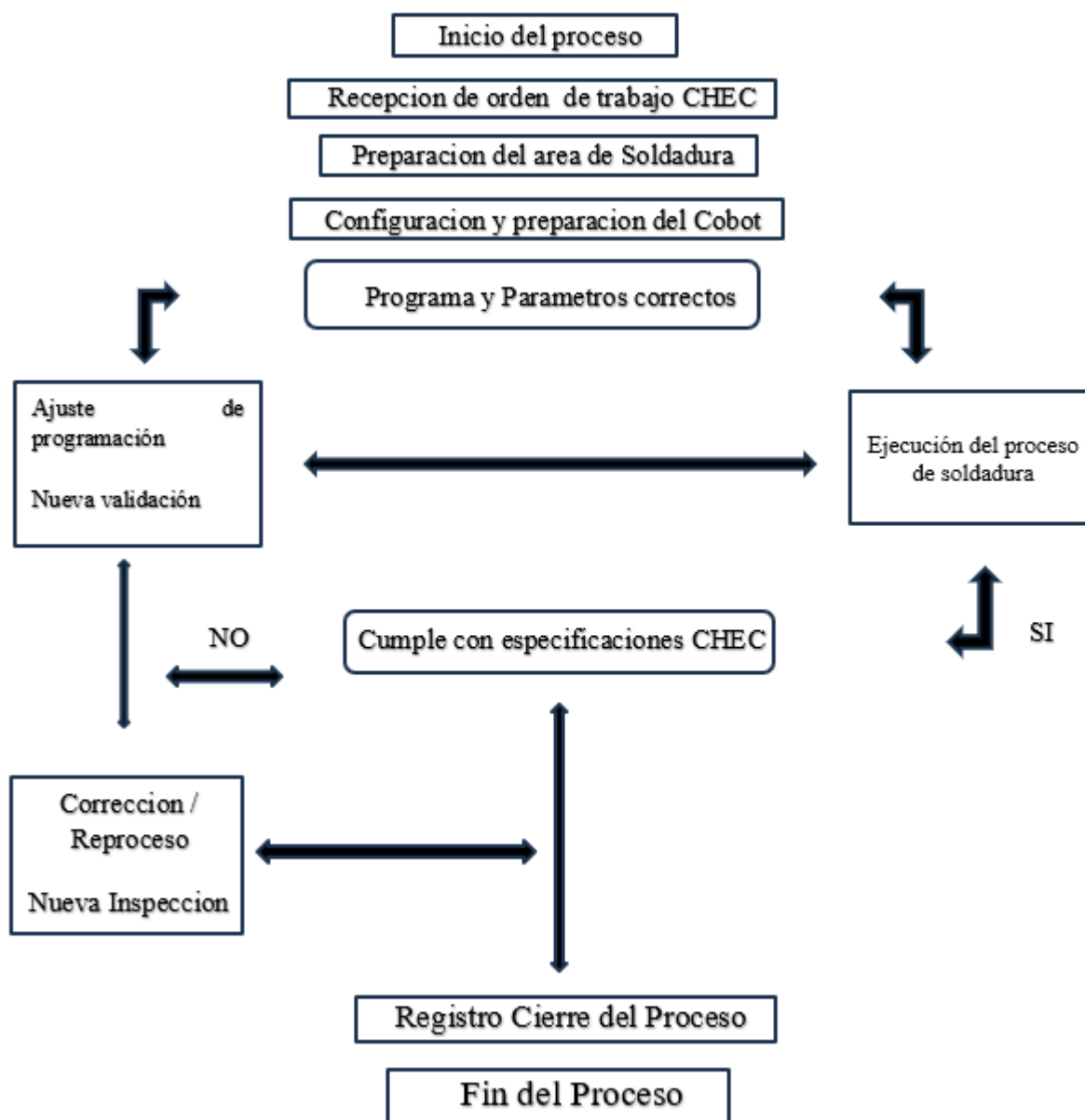
Aplicado a CHEC, la incorporación de cobots en procesos de soldadura representa una

oportunidad estratégica para optimizar las labores de mantenimiento y reparación de infraestructura energética. La capacidad de los cobots para mantener trayectorias constantes y reducir la variabilidad del proceso puede traducirse en una mayor confiabilidad de las uniones críticas en equipos y estructuras, disminuyendo tiempos de parada y costos asociados a Retrabajos. Al mismo tiempo, su flexibilidad operativa los hace especialmente adecuados para un entorno donde la diversidad de piezas y la necesidad de adaptarse a geometrías no estandarizado son frecuentes. De esta manera, la soldadura colaborativa se perfila como una herramienta clave para fortalecer la eficiencia y seguridad de los procesos industriales en CHEC, alineándose con las tendencias globales de modernización y automatización en el sector energético. (Si & Shen, 2025).

Un ejemplo concreto de cómo se aplica el uso del Cobot en CHEC, es la reparación de rodets Francis por cavitación, uno de los problemas recurrentes en centrales de generación. Otro caso es la recuperación de compuertas y mandos para turbinas, como anillos de desgaste, pasadores, bujes. Todo esto antes se adquiría con terceros, ahora CHEC fabrica o remodela.

Figura 43

Diagrama de Flujo del Proceso de Soldadura con cobot en CHEC



La soldadura colaborativa constituye una aplicación avanzada de la robótica colaborativa en procesos de unión metálica, donde el robot y el operario trabajan de manera conjunta en diferentes fases de la operación. A diferencia de los sistemas de soldadura robotizada tradicional,

que suelen estar completamente aislados del trabajador, esta modalidad permite que el robot comparta el espacio de trabajo y apoye tareas específicas sin excluir la intervención humana. De este modo, se logra una fusión entre la repetitividad robótica y la experiencia técnica de las personas, potenciando la calidad y la eficiencia del proceso (Cao, Zhang, & Chen, 2024).

En investigaciones recientes se ha evidenciado que la automatización colaborativa contribuye a estabilizar el arco eléctrico, mantener trayectorias constantes y disminuir defectos asociados a variaciones humanas como la porosidad o la falta de penetración. Además, se ha registrado una reducción significativa en la exposición del operario a humos metálicos, radiación ultravioleta y posturas forzadas, lo que mejora las condiciones de seguridad y ergonomía en el entorno laboral. (Cao et al., 2024).

Desde una perspectiva conceptual, la soldadura colaborativa se enmarca en la manufactura inteligente. La recopilación de datos del proceso (corriente, voltaje, velocidad de avance) permiten realizar ajustes en tiempo real y establecer mecanismos de mejora continua. Esto incrementa la confiabilidad estructural de los componentes críticos, aspecto esencial en sectores como el energético. (Cao et al., 2024).

La implementación de la soldadura colaborativa representa una alternativa intermedia entre la soldadura manual y la automatización totalmente robotizada. El robot colaborativo puede encargarse de mantener el movimiento constante del cordón de soldadura, mientras el operario realiza actividades como posicionar la pieza, preparar el material o supervisar la calidad. Esta sinergia no solo garantiza uniformidad y repetitividad, sino que también reduce la carga física del trabajador, especialmente en piezas de gran tamaño o posiciones difíciles (Cao et al., 2024).

El enfoque colaborativo permite que la precisión y constancia del robot se combinen con el criterio y la experiencia del operario, manteniendo la participación humana dentro del proceso,

pero con apoyo tecnológico. En talleres donde el espacio es muy compartido y no existen celdas robotizadas cerradas, esta modalidad se convierte en una solución flexible y segura. Así, la soldadura colaborativa se perfila como una herramienta clave para cualquier centro tecnológico, al integrar innovación tecnológica, seguridad ocupacional y confiabilidad estructural en los procesos de manufactura avanzada (Cao et al., 2024).

Dependencia de programación adecuada: La automatización de la soldadura requiere una programación precisa para garantizar trayectorias correctas y parámetros de proceso estables. Una programación deficiente puede ocasionar defectos en el cordón, tiempos de arco inadecuados y baja Repetibilidad. La literatura enfatiza que la programación constituye el núcleo de la operación, y su calidad determina la eficiencia y confiabilidad del sistema (Lincoln Electric, s.f.).

Sensibilidad a variaciones geométricas: Los sistemas robotizados de soldadura presentan alta sensibilidad frente a desviaciones geométricas en las piezas. Diferencias mínimas en dimensiones o tolerancias pueden alterar la trayectoria del robot y afectar la penetración del cordón. A diferencia de un soldador humano, que puede corregir manualmente, los sistemas automatizados requieren sensores avanzados y algoritmos de compensación para mantener la calidad (Villa Gonzales, 2023).

Limitaciones en entornos con alta interferencia térmica: La soldadura genera condiciones extremas de temperatura que afectan tanto al material como a los sensores y componentes electrónicos. En entornos con alta interferencia térmica, los sistemas de visión y medición pierden precisión, dificultando el control adaptativo. Además, la expansión térmica de las piezas puede alterar las dimensiones previstas, generando desviaciones en la trayectoria programada (Esquicha, Larico & Esquicha, tejada, 2023).

Dificultades en soldadura de reparación no estandarizada: La soldadura de reparación presenta un escenario complejo para la automatización, ya que las piezas suelen tener geometrías irregulares, desgaste acumulado o daños no previstos en los estándares de fabricación. Los sistemas automatizados, diseñados para condiciones repetitivas, encuentran dificultades para adaptarse a estas variaciones. La falta de estandarización exige un alto grado de flexibilidad, que actualmente se logra más fácilmente mediante la intervención humana (Robotplus, 2024; Gurpea, 2024)

Aplicaciones Específicas de Cobot en Soldadura Industrial en CHEC

Reparación de rodetes Francis por cavitación: El cobot ejecuta cordones uniformes en zonas dañadas, asegurando confiabilidad estructural y reduciendo tiempos de parada. (Simas et al., 2012; Bureau of Reclamation, 2020).

Recuperación de compuertas y mandos de turbinas: Soldaduras de anillos de desgaste, pasadores y bujes, evitando la compra a terceros y fortaleciendo la capacidad interna de fabricación. (Motta et al., 2010; FANUC ,2025).

Mantenimiento de tuberías de gran diámetro: El cobot asume tareas en ambientes con calor y radiación, disminuyendo la exposición de los operarios. (Universal Robots, 2024; WeldFab Word, 2025).

Soldadura de estructuras metálicas grandes: Ejecución de cordones largos y repetitivos con uniformidad, reduciendo retrabajos y asegurando calidad. (Yukawa Motona, 2024; Bühler Welding, 2025).

Fabricación y remodelación de piezas no estandarizadas: flexibilidad para adaptarse a geometrías variables en procesos de mantenimiento y reparación. (ABB Grupo, 2023; Universal Robots, 2024).

Eficiencia, Seguridad y Ergonomía Laboral

La implementación del cobot FANUC CRX25-iA en los procesos de soldadura de CGEC constituye un hito en la modernización industrial, se integran tres componentes claves: eficiencia, seguridad y ergonomía laboral, estas no solo repercuten en la productividad, sino también en la sostenibilidad organizacional y bienestar de los trabajadores.

Eficiencia: El CRX25-iA se caracteriza por su capacidad de carga de 25 kg y su alcance de 1889 mm, lo que le permite manipular piezas de gran tamaño con precisión y repetitividad. Su facilidad de programación y adaptación a diferentes tareas reduce los tiempos de ciclo y asegura uniformidad en la calidad de las soldaduras, disminuyendo retrabajos y costos asociados (FANUC, 2024). Asimismo, su integración con periféricos y sistemas de control potencia la productividad al mantener un flujo de trabajo ágil y confiable (ISO, 2021).

Seguridad: El diseño colaborativo del CRX25-iA incorpora sensores de fuerza y funciones de parada automática que minimizan riesgos de colisión con los operarios. Un ejemplo es la detección inmediata de contacto: si el cobot encuentra resistencia inesperada, se detiene automáticamente, evitando accidentes durante la manipulación de piezas pesadas (International Organization for Standardization, 2016). Además, al asumir tareas en ambientes con calor y radiación, como la soldadura de tuberías de gran diámetro, el cobot reduce la exposición directa de los trabajadores a riesgos físicos y ambientales, fortaleciendo la cultura de prevención de accidentes en CHEC.

Ergonomía Laboral: La delegación de tareas repetitivas y físicamente exigentes al cobot disminuye la fatiga muscular y el riesgo de lesiones por movimientos repetitivos. Por ejemplo, en la soldadura de uniones largas y continuas, el cobot ejecuta el trabajo mientras el operario supervisa el proceso desde una posición cómoda, evitando posturas forzadas y prolongadas. Esto

no solo favorece la salud ocupacional, sino también incrementa la satisfacción laboral al transformar el rol del trabajador hacia funciones más estratégicas y creativas, como la programación de trayectorias o la inspección de calidad (Villani, Pini, Leali, & Secchi, 2018).

La aplicación del cobot en CHEC fortalece la eficiencia productiva, garantiza la seguridad industrial y mejora la ergonomía laboral, consolidando un modelo de automatización colaborativa que impulsa la innovación y el bienestar organizacional. Este enfoque integral convierte la robótica colaborativa en un motor de desarrollo sostenible, alineado con los objetivos de modernización de la empresa.

Tabla 17

Eficiencia, Seguridad y Ergonomía del Robot CRX25-iA

Dimensión	Beneficio principal	Ejemplo en CHEC	Referencia
Eficiencia	Reducción de tiempos de ciclo y uniformidad en la calidad.	El cobot ejecuta cordones de soldadura en estructuras metálicas grandes en menos tiempo que un operario, asegurando consistencia y disminuyendo retrabajos.	FANUC (2024); ISO (2021)
Seguridad	Minimización de riesgos de colisión y exposición a	El CRX25-iA se detiene automáticamente al	International Organization for Standardization

Dimensión	Beneficio principal	Ejemplo en CHEC	Referencia
	ambientes hostiles.	detectar contacto inesperado, evitando accidentes durante la manipulación de piezas pesadas. Además, asume tareas en zonas con calor y radiación.	(2016)
Ergonomía	Reducción de fatiga y mejora de posturas de trabajo.	En la soldadura de uniones largas, el cobot realiza el trabajo mientras el operario supervisa desde una posición cómoda, evitando posturas forzadas y mejorando la salud ocupacional.	Villani, Pini, Leali & Secchi (2018)

Nota. Esta tabla nos muestra la Eficiencia, seguridad y ergonomía del robot CRX25-iA.

Limitaciones Específicas de Cobot en Soldadura Industrial

Precisión comparativa: Menor exactitud frente a robots industriales rígidos con

tolerancias muy exigentes. (FANUC, 2025).

Programación en alta variabilidad geotérmica: complejidad para definir trayectorias con geometrías irregulares o no repetitivas. (FANUC, 2025).

Velocidad de operación: Generalmente inferior a la de robots industriales tradicionales, lo que limita su uso en grandes series productivas. (FANUC, 2025).

Dependencia de supervisión humana: Aunque reduce la carga física, requiere acompañamiento constante para ajustes y control de calidad. (FANUC, 2025).

Aplicaciones vs limitaciones.

Tabla 18

Dimensión, Aplicación y Limitaciones en CHEC

Dimensión	Aplicación en CHEC	Limitaciones en CHEC
Mantenimiento	Reparación de rodets Francis, recuperación de compuertas y mandos de tuberías	Precisión menor frente A robots rígidos.
Producción	Soldadura de estructuras metálicas grandes, cordones largos y repetitivos	Velocidad de operación inferior
Flexibilidad	Adaptación a geometrías variables y piezas no estandarizadas	Programación compleja en alta variabilidad geométrica
Seguridad laboral	Asume tareas en ambientes hostiles, reduciendo	Necesidad de supervisión humana constante

Dimensión	Aplicación en CHEC	Limitaciones en CHEC
	exposición de operarios	

Nota. Esta tabla nos muestra la Dimensión, aplicación y limitaciones en CHEC.

Soldadura de Recuperación de Rodetes

El CRX-25iA puede aplicarse en CHEC para la soldadura de recuperación de rodets Francis, siempre que se cumplen ciertos requisitos técnicos y de seguridad. Su capacidad de carga de 25kg, alcance de 1889mm y Repetibilidad de 0.05mm lo hacen viable para manipular antorchas MIG y ejecutar cordones de alta precisión en superficies erosionadas (CHEC; 2026, Fanuc 2025). Sin embargo, aunque es un cobot colaborativo, en procesos de soldadura es indispensable contar con una celda protegida. Debido a la radiación UV del arco, las proyecciones de chispas y los humos metálicos (CHEC; 2026, OSHA, 2024). Esta celda puede ser modular, con cortinas de seguridad y sistemas de extracción, permitiendo interacción segura con los operarios (CHEC, 2026).

La integración con una fuente MIG industrial es obligatoria, ya que el CRX- 25iA no incluye fuente propia (FANUC, 2025). Fuentes como la Lincoln Electric Power Wave R450 permiten parametrizar voltaje, velocidad de alambre y gas protector directamente desde la interfaz del cobot, garantizando calidad en la recuperación de piezas críticas (Lincoln Electric, 2025). Con esa configuración, los escenarios de aplicación en CHEC incluyen. Reconstrucción de bordes y superficies dañadas de rodets Francis, refuerzo preventivo en zonas críticas para reducir paradas no programadas, automatización parcial con asistencia humana y programación de trayectorias desde modelos CAD/CAM para geometrías complejas. (CHEC, 2026; Autodesk, 2025).

La implementación del CRX-25iA en CHEC es técnicamente viable, pero requiere una celda protegida y la integración con una fuente MIG industrial. Esto permitiría modernizar el mantenimiento hidroeléctrico, aumentar la precisión en la recuperación de rodets y reducir tiempos de recuperación, alineando la operación con estándares de seguridad y productividad.

Soldadura de Ejes Estructurales Medianos

La soldadura de ejes estructurales medianos es técnicamente viable, pero presenta limitaciones importantes cuando se trata de geometrías complejas, principalmente por accesibilidad y control de calidad en la ejecución. Los procesos más utilizados son la soldadura por arco eléctrico (SMAW, FCAW), aunque requieren ajustes en diseño y preparación para garantizar resistencia y evitar defectos.

Comparación de procesos

Tabla 19

Proceso, Ventajas y Limitaciones de la Soldadura

Proceso	Ventajas	Limitaciones
SMAW	Económico, versátil.	Baja productividad, difícil en accesos complejos.
FCAW-S	Alta penetración, buena soldabilidad en ASTM A 572	Requiere control de Gases y accesibilidad.
GMAW/MIG	Excelente calidad, menos defectos	Necesita equipos sofisticados Y acceso libre.

Nota. Esta tabla nos muestra Proceso, ventajas y limitaciones de la soldadura.

La soldadura de ejes estructurales medianos es viable y segura si se selecciona el proceso adecuado y se consideran las limitaciones de accesibilidad en geometrías complejas. La clave está en el diseño previo de la unión, la planificación de secuencias de soldadura y la aplicación de normas de calidad.

Viabilidad de la Soldadura en Procesos Aplicables

SMAW (electrodo revestido): Versátil, pero limitado en accesos difíciles.

FCAW (Electrodo tubular autoprotegido): mayor productividad y penetración, útil en estructuras medianas.

GMAW/MIG: Recomendado en talleres con buena accesibilidad y control de parámetros.

Materiales comunes: acero estructural ASTM A572 Grado 50 y similares, con buena soldabilidad.

Resistencia: La unión puede alcanzar propiedades mecánicas similares al material base si se cumplen normas de diseño y ejecución.

Limitaciones en Geometrías Complejas

Accesibilidad: en zonas confinadas o con ángulos cerrados dificultan el posicionamiento del electrodo.

Control de calidad: inspección visual y ensayos no destructivos se complican en áreas de difícil acceso.

Distorsión térmica: mayor riesgo en piezas con geometrías irregulares, lo que exige secuencias de soldadura planificadas.

Reparaciones menores de compuertas: Las reparaciones menores de compuertas en las centrales hidroeléctricas presentan alta viabilidad y bajo riesgo técnico, especialmente cuando se realizan en el taller de Alta Ingeniería de CHEC, que cuenta con maquinaria especializada y

experiencia en mantenimiento de infraestructura energética. Estas condiciones permiten asegurar continuidad operativa y optimizar costos frente a intervenciones mayores. (CHEC, S.F; VQ Ingeniería, s.f.).

Viabilidad de Reparaciones Menores

Alta viabilidad técnica:

Se trata de trabajos rutinarios como ajustes de sellos, lubricación de mecanismos, alineación de compuertas y sustitución de piezas menores.

No requieren desmontes completos ni paradas prolongadas de la central.

Se apoyan en metodologías de factibilidad técnica que aseguran que los recursos, materiales y capacidades estén disponibles (VQ Ingeniería, s.f.).

Beneficios:

Reducción de costos frente a reparaciones mayores.

Menor tiempo de inactividad de las turbinas y compuertas.

Extensión de la vida útil de los equipos.

Riesgo eléctrico:

Bajo riesgo eléctrico:

Son intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo de baja complejidad.

El riesgo de falla estructural es mínimo, ya que no se manipulan elementos críticos como ejes principales o sistemas hidráulicos de gran escala.

Se ejecutan bajo protocolos de seguridad y supervisión de ingenieros especializados (CHEC, s.f.).

Las reparaciones menores de compuertas en el contexto de CHEC son altamente viables y de bajo riesgo técnico gracias al soporte del taller de Alta Ingeniería. Esto las convierte en una

estrategia eficaz para mantener la confiabilidad de las centrales hidroeléctricas, optimizar recursos y garantizar la continuidad del servicio energético.

Limitaciones Técnicas Identificadas

No puede operar en modo colaborativo durante soldadura por arco: Los robots colaborativos están diseñados para trabajar cerca de humanos, pero en soldadura por arco el riesgo de radiación, calor y salpicaduras hace inviable la interacción directa. Se requiere un modo automático o aislado, no colaborativo.

Requiere reclasificación según ISO 10218: La norma ISO 10218 regula la seguridad de robots industriales. Un cobot usado en soldadura debe reclasificarse como robot industrial, ya que las condiciones de riesgo superan las de un entorno colaborativo estándar.

Necesita barreras físicas: para proteger al personal de radiación ultravioleta, chispas y calor, se deben instalar pantallas, cortinas ignífugas o celdas cerradas. Esto contradice parcialmente la filosofía de trabajo abierto de los robots.

Requiere integración especializada con fuente de soldadura: El robot debe comunicarse con la fuente de soldadura (parámetros de corriente, voltaje, sincronización de arco). Esto exige interfaces específicas y software de integración, no estándar en todos los cobots.

Posible limitación en piezas de gran tonelaje: Los cobots suelen tener cargas útiles reducidas (10-20 kg). En un taller de alta ingeniería, donde se manipulan piezas pesadas. Puede ser necesario un cobot industrial de mayor capacidad o sistemas de posicionamiento adicionales.

Protección adicional contra salpicadura térmica: Es necesario equipar al robot con cubiertas, chaquetas térmicas o sistemas de protección para evitar daños en sensores, cables y articulaciones por las salpicaduras de metal fundido.

Espacio físico para celda de seguridad: Aunque los cobots suelen destacarse por su

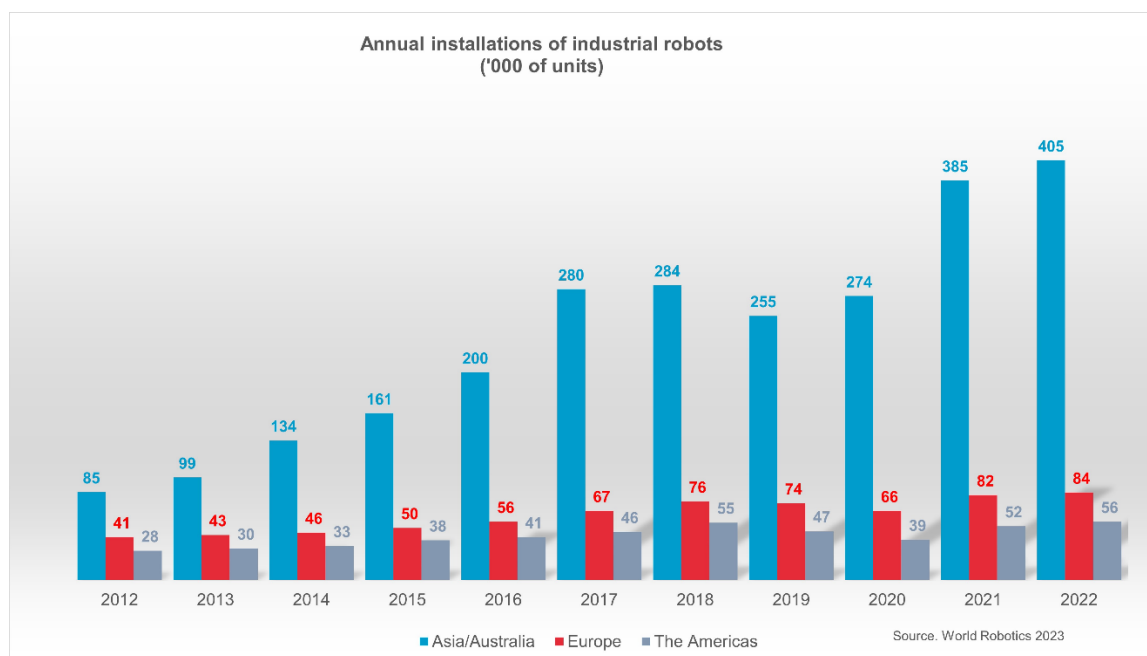
flexibilidad en espacios reducidos, en soldadura se requiere una celda cerrada con ventilación y extracción de humos, lo que aumenta la necesidad de espacio.

Discusión

La adopción global de robótica industrial evidencia un crecimiento sostenido. Según el informe World Robotics 2023 de la International Federation of Robotics (IFR, 2023), el stock operativo mundial alcanzó aproximadamente 3,9 millones de robots industriales en 2022, con más de 553.000 nuevas instalaciones en ese año. Como se observa en la Figura 2, el crecimiento sostenido de la robótica industrial evidencia una consolidación tecnológica a escala global.

Figura 44

Crecimiento Global de la Robótica Industrial



Nota. Esta figura muestra el Crecimiento global de la robótica industrial como contexto de adopción de cobots. Fuente: IFR (2023).

Dentro de este crecimiento, los robots colaborativos representan cerca del 10 % de las nuevas implementaciones anuales, consolidándose como uno de los segmentos de mayor expansión en la automatización industrial. (International Federation of Robotics, 2023). Este

panorama indica que la robótica colaborativa ya no constituye una tecnología emergente marginal, sino una solución adoptada progresivamente en múltiples sectores manufactureros. (Villani, Pini, Leali & Secchi, 2018; ISO, 2016).

En América Latina, la adopción de robots industriales continúa siendo moderada frente a Asia y Europa. (IFR, 2023). Países como Brasil y México concentran la mayor parte de las instalaciones regionales, mientras que Colombia presenta una densidad robótica aún limitada, lo que sugiere un amplio margen de crecimiento en automatización industrial (IFR, 2023). Esta brecha entre la consolidación tecnológica global y la adopción incipiente a nivel nacional plantea la necesidad de estudios aplicados que evalúen la viabilidad real de estas tecnologías en contextos industriales específicos. (Bogue, 2018).

En este escenario, la posible implementación del robot colaborativo FANUC CRX-25iA en la CHEC se inscribe dentro de una etapa temprana de madurez tecnológica en el país, representando no solo una oportunidad estratégica de modernización, sino también un caso de análisis que permite examinar cómo los postulados teóricos de la colaboración humano–robot pueden materializarse en entornos de mantenimiento industrial. (Haddadin, De Luca & Albuschaffer, 2017; ISO, 2016).

La presente investigación tuvo como propósito analizar la factibilidad de implementación de robótica colaborativa (FANUC CRX-25iA) en procesos de soldadura desarrollados en el Taller de Alta Ingeniería de la CHEC, integrando una revisión documental especializada. Los resultados obtenidos en este estudio permiten contrastar críticamente los postulados teóricos de la colaboración humano–robot (HRC) con las condiciones reales del Taller de Alta Ingeniería de la CHEC.

Los resultados de la caracterización técnica indican que el sistema evaluado presenta

especificaciones compatibles con tareas de soldadura en componentes medianos, particularmente en operaciones repetitivas y de trayectoria definida. Estos hallazgos coinciden con los criterios de adopción tecnológica descritos por Schumacher *et al.*, (2022), quienes señalan que la capacidad de carga, el alcance efectivo y la repetitividad constituyen variables determinantes en la integración de cobots en procesos de soldadura por arco.

Sin embargo, la literatura reciente enfatiza que la factibilidad técnica no debe limitarse a la compatibilidad nominal de especificaciones, sino que requiere análisis sistémicos de integración, interoperabilidad con fuentes de poder y adaptación a condiciones reales de operación (Keshvarparast *et al.*, 2023; Urrea & Kern, 2025). En este sentido, aunque el sistema presenta aptitud técnica preliminar, su implementación en el Taller de Alta Ingeniería demandaría validaciones experimentales que confirmen su desempeño en piezas con alta variabilidad geométrica y tolerancias críticas.

Desde la perspectiva de eficiencia operativa, los estudios revisados evidencian que la soldadura colaborativa puede incrementar la estabilidad del proceso, reducir retrabajos y mantener consistencia en parámetros críticos (Colombo *et al.*, 2017). En el contexto analizado, caracterizado por intervenciones en rodetes, álabes y componentes estructurales, la repetitividad del sistema podría contribuir a estandarizar cordones en superficies de recuperación.

No obstante, el Taller de Alta Ingeniería opera bajo un esquema de mantenimiento con alta variabilidad de piezas y geometrías. Esta característica introduce una tensión relevante sobre que mientras que la literatura sobre Industria 4.0 asocia la automatización con eficiencia en entornos productivos estructurados (Zhong *et al.*, 2017), los escenarios de mantenimiento requieren flexibilidad.

El análisis contextual evidenció riesgos ergonómicos y exposición térmica inherentes a la

soldadura manual. La literatura sobre interacción humano–robot establece que la robótica colaborativa puede contribuir a redistribuir cargas físicas y reducir exposición directa a fuentes de riesgo (Haddadin & Croft, 2016). Asimismo, los estándares ISO 10218-1 e ISO/TS 15066 definen límites de fuerza y modos de operación que permiten compartir espacios de trabajo bajo criterios de seguridad estructurada.

Sin embargo, es importante subrayar que la seguridad en HRC no es un atributo automático del sistema, sino el resultado de una correcta evaluación de riesgos, configuración de velocidades y delimitación funcional de tareas (Patalas-Maliszewska *et al.*, 2025). En el caso del Taller de Alta Ingeniería, la reducción de riesgos dependería de la adecuada integración del cobot con protocolos existentes y del rediseño parcial del espacio de trabajo. Por tanto, la robótica colaborativa se presenta como un medio potencial para mejorar condiciones laborales, pero no sustituye la necesidad de análisis preventivos sistemáticos.

Desde la perspectiva integral de esta investigación, la implementación del robot colaborativo FANUC CRX-25iA puede considerarse positiva y técnicamente viable, siempre que su adopción se realice de manera gradual y estratégicamente planificada. Los resultados evidencian que el sistema presenta compatibilidad técnica con tareas repetitivas y ergonómicamente exigentes, lo que permitiría mejorar la estabilidad del proceso de soldadura y reducir la exposición directa del operario a riesgos térmicos y posturales. No obstante, el estudio también identifica limitaciones asociadas a la variabilidad geométrica de las piezas y a la necesidad de integración con infraestructura existente (Dhanda *et al.*, 2025; Longo *et al.*, 2017).

En consecuencia, el uso de cobots no debe concebirse como sustitución del conocimiento experto del soldador, sino como una herramienta complementaria dentro de un sistema sociotécnico. En el contexto específico del Taller de Alta Ingeniería, la evidencia analizada

permite concluir que la incorporación del CRX-25iA sería favorable en aplicaciones de trayectoria definida y recuperación superficial estandarizada, mientras que las intervenciones altamente artesanales continuarían dependiendo del criterio técnico del operario. Por tanto, la decisión de implementación resulta técnicamente justificable, organizacionalmente coherente y alineada con tendencias globales de modernización industrial, aunque su consolidación exige validación experimental y evaluación económica detallada.

Conclusiones

Los cobots suponen un progreso notable con respecto a la robótica industrial convencional, ya que posibilitan que robots y seres humanos interactúen de manera segura en un mismo entorno laboral. La literatura revisada demuestra que estos sistemas se fundamentan en los principios de la colaboración humano-robot (HRC), incorporando sensores de fuerza, control de velocidad y mecanismos de detención segura que disminuyen considerablemente los riesgos laborales. Estas particularidades hacen posible que los procedimientos productivos se adapten a ambientes con gran variabilidad y brindan una flexibilidad operativa mayor, lo cual es consistente con los principios de la Industria 4.0 y de la manufactura flexible.

La soldadura colaborativa constituye una alternativa viable para mejorar la eficiencia, la calidad y la seguridad del proceso. La integración de cobots en soldadura MIG y TIG favorece la uniformidad del cordón, reduce la variabilidad asociada al factor humano y disminuye los tiempos de ciclo en tareas repetitivas. Además, se evidencian beneficios importantes en términos de seguridad y ergonomía, ya que el operario reduce su exposición a riesgos térmicos, posturas forzadas y esfuerzos físicos prolongados, manteniendo un rol activo en la supervisión y control de calidad. No obstante, también se identifican desafíos relacionados con la correcta parametrización del proceso, la evaluación de riesgos y la capacitación del personal, los cuales deben ser considerados para garantizar una implementación efectiva y segura de la soldadura colaborativa en entornos industriales reales.

Las labores de mantenimiento y arreglo de elementos metalmecánicos, por ejemplo, turbinas, álabes y estructuras metálicas, son notoriamente demandantes a nivel técnico, presentan una variabilidad geométrica y conllevan riesgos ergonómicos; esto último fundamenta la inclusión de soluciones adaptables que se basen en la cooperación entre humanos y robots.

Bibliografia

- Arjomandi, M., & Mukherjee, T. (2026). A review of applications of collaborative robot in welding and additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 100, 103256.
- Arvola, M., Ek, S., & Jokinen, K. (2021). Welding Door Frames with Collaborative Robot. *Oulun ammattikorkeakoulun tekniikan ja luonnonvara-alan lehti: Oamk_telulainen*, 2(4), 39–40.
- Bi, Z. M., Luo, C., Miao, Z., Zhang, B., Zhang, W. J., & Wang, L. (2021). Safety assurance mechanisms of collaborative robotic systems in manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102022.
- Bogue, R. (2018). What are the prospects for robots in the construction industry? *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 45(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1108/IR-11-2017-0194>
- Cao, Y., Zhou, Q., Yuan, W., Ye, Q., Popa, D., & Zhang, Y. M. (2024). Human-robot collaborative assembly and welding: A review and analysis of the state of the art. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 1388–1403.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.044>
- Calvo, R., & Gil, P. (2022). Evaluation of collaborative robot sustainable integration in manufacturing assembly by using process time savings. *Materials*, 15(2), 611
- Calzavara, M., Faccio, M., & Granata, I. (2023). Multi-objective task allocation for collaborative robot systems with an Industry 5.0 human-centered perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(1), 297–314.
- Campbell, J., & Pawley, J. (2020). Cobot Welding Offers the Spark to Overcome Labor

- Shortages. *Welding Journal*, 99(10), 32–36.
- Chaiprabha, K., Phanomchoeng, G., Chutima, P., Ma, N., Sungkakseem, K., Suthithanakom, S., & Chanchaoren, R. (2025). Advancing Industry 5.0: Collaborative Welding Robotics with Precision, Safety, and Flexibility. *IEEE Access*.
- Chec. (2024a) Informe de Gestión Técnica y operativa. Central Hidroeléctrica de Caldas.
- Chec. (2024b) plan de modernización tecnológica. Central Hidroeléctrica de Caldas.
- Chen, Z. (2025, October). Research Progress and Trends in Flexible Design of Industrial Robot Assembly Systems for Mass Customization. In *2025 2nd International Conference on Electrical Engineering and Intelligent Control (EEIC 2025)* (pp. 627–638). Atlantis Press.
- Colombo, A. W., Karnouskos, S., Kaynak, O., Shi, Y., & Yin, S. (2017). Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), 6–16.
<https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2648857>
- Commission, E., for Research, D.-G., & Innovation. (2021). *Industry 5.0 – Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2777/308407>
- Crawford, M. L., Reynolds, S. T., & Price, J. E. (2026). Enhancing Structural Integrity and Precision: The Impact of Robotic Welding Technologies in Construction Engineering
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials*

Science, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>

- Dhanda, M., Rogers, B. A., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93(1), 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015 81:1, 81(1), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- Duhanets, V., Semenyshena, R., Fedirko, P., Pukas, V., & Volynkin, M. (2025). Application of automated welding processes in the restoration of pipelines of power facilities. *Machinery & Energetics*, 16(1).
- Endraß, M., Engelschall, M., Mayer, M., Gänswürger, P., Vistein, M., Schönheits, M., ... & Kupke, M. (2022). Robust assembly-quality assured welding technologies for full-scale applications.
- Erdős, F. G., Abai, K., Beregi, R. J., Csempesz, J., Cserteg, T., Godó, G., ... & Váncza, J. (2024). Enabling Technologies for Autonomous Robotic Systems in Manufacturing. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 41(4), 403–431.
- Faccio, M., & Cohen, Y. (2024). Intelligent cobot systems: human-cobot collaboration in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(5), 1905–1907. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02142-z>
- Fanuc. (2022) CRX25-iA collaborative robot specifications. FANUC Robotics.

- Fanuc. (2024) CRX25-iA collaborative robot specifications. FANUC Robotics.
- Ferreira, N. M. F. (2023). *The Use of Collaborative Robots for Tasks with Arc Welding*.
<https://doi.org/10.20944/preprints202308.1517.v1>
- Ferraguti, F., Villani, V., & Storchi, C. (2023). MyWelder: A collaborative system for intuitive robot-assisted welding. *Mechatronics*, 89, 102920
- Gao, S., Geng, H., Ge, Y., & Zhang, W. (2024). ARM Cortex Simulation Design for Trajectory Curves Evaluation of Collaborative Robots' Tungsten Inert Gas Welding. *Processes*, 12(6), 1095.
- Garcia, C. A., Montalvo-Lopez, W., & Garcia, M. V. (2020). Human-robot collaboration based on cyber-physical production system and MQTT. *Procedia Manufacturing*, 42, 315–321.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Grigore, E. C., Eder, K., Lenz, A., Skachek, S., Pipe, A. G., & Melhuish, C. (2011). Towards Safe Human-Robot Interaction. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 6856 LNAI, 323–335. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23232-9_29
- Groover, M. P. (2021). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing* (5th Edition). Pearson.
- Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R. (2021). Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review.

Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 67(2), 101998.

<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101998>

Guha, N., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-

Tallaa, L., Vilahur, N., Muller, K., & Straif, K. (2017). Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. *The Lancet Oncology*, 18(5), 581–582.

[https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(17\)30255-3](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(17)30255-3)

Haddadin, S., & Croft, E. (2016). Physical Human-Robot Interaction. *Springer Handbook of*

Robotics, 2nd Ed., 1835–1874. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_69

Kakade, S., Patle, B., Umbarkar, A., Patle, B., Kakade, S., & Umbarkar, A. (2023).

Applications of collaborative robots in agile manufacturing: a review. *Robotic*

Systems and Applications, 3(1), 59–83. <https://doi.org/10.21595/ras.2023.23238>

Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., & Pirayesh, A. (2023). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda.

Journal of Intelligent Manufacturing 2023 35:5, 35(5), 2065–2118.

<https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>

Kocsi, B., Matonya, M. M., Pusztai, L. P., & Budai, I. (2020). Real-Time Decision-Support System for High-Mix Low-Volume Production Scheduling in Industry 4.0.

Processes 2020, Vol. 8, Page 912, 8(8), 912. <https://doi.org/10.3390/PR8080912>

Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles,

design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 121–136.

<https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>

Krüger, J., Wang, L., Verl, A., Bauernhansl, T., Carpanzano, E., Makris, S., Fleischer, J.,

Reinhart, G., Franke, J., & Pellegrinelli, S. (2017). Innovative control of assembly

systems and lines. *CIRP Annals*, 66(2), 707–730.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.010>

Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20–23.

<https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>

Liu, H. Y., & Hayton, J. (2026). Collaborative welding robots and their impact on welders' work experience in the UK. *Economic and Industrial Democracy*.

Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2017). Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Computers and Industrial Engineering*, 113, 144–159.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.016>

Lorenzini, M., Lagomarsino, M., Fortini, L., Gholami, S., & Ajoudani, A. (2023).

Ergonomic human-robot collaboration in industry: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 813907. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.813907>

Lu, Y. (2017a). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10.

<https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

Lu, Y. (2017b). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10.

<https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>

Maculotti, G., Khusnuddinov, F., Kholkhujayev, J., Genta, G., & Galetto, M. (2025).

Traceable digital twin for accurate positioning of industrial robot arms in human–robot collaborative systems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.

- Malakmohamadi, S. (2025). *Optimizing the usability and integration of collaborative robots in the welding industry*.
- Malik, A. A., & Masood, T. (2026). Adaptive human–robot collaboration in wind turbine manufacturing using digital twins. *Scientific Reports*.
- Manzanares Vega, C. F. (2022). *Productivity and Quality Evaluation in Assembly Using Collaborative Robots*.
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics 2019, Vol. 8, Page 100, 8(4)*, 100. <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>
- Ninkovic, V., Vincan, V., Kundacina, O., Gojic, G., & Miskovic, D. *AI-Driven Collaborative Welding: Innovations in System Setup and Intelligent Manufacturing*.
- Othman, U., & Yang, E. (2023). Human–Robot Collaborations in Smart Manufacturing Environments: Review and Outlook. *Sensors 2023, Vol. 23, Page 5663, 23(12)*, 5663. <https://doi.org/10.3390/s23125663>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalo, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Palanisamy, C., Perumal, L., & Chin, C. W. (2025). A Comprehensive Review of Collaborative Robotics in Manufacturing. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(2), 21970–21975. <https://doi.org/10.48084/etasr.9709>

- Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S., & Norrish, J. (2012). Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(2), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.08.004>
- Patalas-Maliszewska, J., Łosyk, H., & Dudek, A. (2025). Improving safety in human–robot collaboration towards sustainable production in Industry 5.0. *Journal of Intelligent Manufacturing 2025*, 1–36. <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02676-4>
- Pauliková, A., Gyurák Babeřová, Z., & Ubářová, M. (2021). Analysis of the impact of human–cobot collaborative manufacturing implementation on the occupational health and safety and the quality requirements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 1927.
- Polonara, M., Romagnoli, A., Biancini, G., & Carbonari, L. (2024). Introduction of collaborative robotics in the production of automotive parts: a case study. *Machines*, 12, 196.
- Poolsilapa, B. (2025). *Integration of Collaborative Robots for Welding Hull Structur*
- Riccelli, M. G., Goldoni, M., Poli, D., Mozzoni, P., Cavallo, D., & Corradi, M. (2020). Welding Fumes, a Risk Factor for Lung Diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health 2020, Vol. 17, Page 2552*, 17(7), 2552. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072552>
- Romero, D., & Stahre, J. (2021). Towards The Resilient Operator 5.0: The Future of Work in Smart Resilient Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 104(15), 1089–1094. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.183>
- Sarivan, I. M., Madsen, O., & Wæhrens, B. V. (2024). Automatic welding-robot programming based on product-process-resource models. *The International Journal*

of Advanced Manufacturing Technology 2024 132:3, 132(3), 1931–1950.

<https://doi.org/10.1007/s00170-024-13409-x>

Schumacher, S., Hall, R., Waldman-Brown, A., & Sanneman, L. (2022). Technology

Adoption Of Collaborative Robots For Welding in Small And Medium-sized

Enterprises: A Case Study Analysis. *Proceedings of the Conference on Production*

Systems and Logistics, 462–471. <https://doi.org/10.15488/12176>

Sheikhi, S., Subadra, S. P., Langer, R., Ebel, L. C., Mayer, E., Zuther, P., & Maaß, J.

(2025). Improving Health and Safety in Welding Through Remote Human–Robot

Collaboration. *Processes 2025, Vol. 13, Page 3017, 13(9), 3017.*

<https://doi.org/10.3390/pr13093017>

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and

guidelines. *Journal of Business Research*, 104(1), 333–339.

<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>

Starke, G., Hahn, D., Pedroza Yanez, D. G., & Ugalde Leal, L. M. (2016). Self-organization

and self-coordination in welding automation with collaborating teams of industrial

robots. *Machines*, 4(4), 23.

Stewart, J. (2025). *Using Cobot Welding to Reduce the Welder Workforce Shortage: A*

Basic Qualitative Study of the Perceptions of Manufacturing Managers in Small and

Medium Size Enterprises in the United States (Doctoral dissertation, American

College of Education).

Suryoputro, M. R., Zhang, T., & Kiridena, S. (2025). Ergonomics and safety in human–

collaborative robot interaction: A review of literature for manufacturing industries.

International Journal of Industrial Ergonomics, 110, 103837.

<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2025.103837>

- Tannous, M., Miraglia, M., Inglese, F., Giorgini, L., Ricciardi, F., Pelliccia, R., ... & Stefanini, C. (2020). Haptic-based touch detection for collaborative robots in welding applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *64*, 101952.
- Urrea, C., & Kern, J. (2025). Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications. *Processes* *2025*, *Vol. 13*, *Page 832*, *13*(3), 832. <https://doi.org/10.3390/pr13030832>
- Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, *55*, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
- Wang, J., Li, L., & Xu, P. (2023). Visual sensing and depth perception for welding robots and their industrial applications. *Sensors*, *23*(24), 9700.
- Wang, K., Ding, L., Dailami, F., & Matthews, J. (2025). A Contemporary Review of Collaborative Robotics Employed in Manufacturing Finishing Operations: Recent Progress and Future Directions. *Machines* *2025*, *Vol. 13*, *Page 772*, *13*(9), 772. <https://doi.org/10.3390/machines13090772>
- Xiao, J., & Huang, K. (2024). A comprehensive review on human–robot collaboration remanufacturing towards uncertain and dynamic disassembly. *Manufacturing Review*, *11*, 17. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2024015>
- Zhang, W., & Li, J. (2024). The Application of Intelligent Welding Robots and Visual Detection Algorithms in Building Steel Structures. *Scalable Computing: Practice and Experience*, *25*(5), 4265–4273.

Zheng, J., Zhang, Y., Gao, Y., Chen, Z., Gao, Y., Zhou, C., & Zhou, X. (2025).

Optimization of Multi-Agent Scheduling Based on MA-ID3QN for the Riveting and Welding Work Cell. *IEEE Access*.

Zheng, P., wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., Yu, S., & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering 2018 13:2*, 13(2), 137–150. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>

Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>