

# **Robots colaborativos en entornos de manufactura flexible: análisis de sistemas de seguridad, interfaces humano-robot y optimización de celdas de trabajo**

*Collaborative robots in flexible manufacturing environments: analysis of safety systems, human-robot interfaces and optimization of work cells*

Juan José Pérez Insuasti, Víctor Manuel Flores Andino.

Juan José Pérez Insuasti

SICAP Consultoría Académica y Profesional. Riobamba, Ecuador.

Grupo de Investigación Quarks

Ingeniero en Electrónica, Telecomunicaciones y Redes. Escuelas Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Informática y Electrónica.

perez.insuasti.juan.jose@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-4825-1269>

Víctor Manuel Flores Andino

Instituto Superior Universitario Carlos Cisneros, Carrera de Tecnología Superior en Electrónica, Automatización y Telecomunicaciones. Riobamba, Ecuador.

Grupo de Investigación Quarks.

Ingeniero en Electrónica y Control. Escuela Politécnica Nacional.

victor.flores@istcarloscisneros.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5686-6864>

Recibido: 2026/05/04

Aceptado: 2026/05/20

Publicado: 2026/06/01

**DOI:** 10.5281/zenodo.20501643

## Abstract

**Introduction:** The emergence of collaborative robots (cobots) in flexible manufacturing environments represents one of the most significant technological phenomena of Industry 4.0 and 5.0, radically transforming the relationship between human operators and automated systems in shared production spaces. The convergence of artificial intelligence, computer vision, advanced sensing, and regulatory frameworks such as ISO/TS 15066 has opened a multidisciplinary research field in which safety, ergonomics, and productive efficiency constitute inseparable articulating axes. **Objective:** To analyze the current state of knowledge on collaborative robots in flexible manufacturing environments, with emphasis on safety systems, human-robot interfaces, and work cell optimization, identifying trends, advances, and existing gaps in the scientific literature. **Methodology:** A bibliographic investigation with a descriptive approach and analysis-synthesis method was conducted through a non-systematic review of 43 indexed scientific sources published preferably between 2024 and 2026, using keywords such as cobots, flexible manufacturing, HRI, ISO/TS 15066, and presence detection. **Results:** Four central thematic dimensions were identified: safety systems and regulations, multimodal human-robot interfaces, collaborative cell optimization, and adaptive control architectures. Cobots reduce assembly times by up to 30% and operational errors by an equal proportion, while the integration of visual sensors and YOLO algorithms achieves accuracies exceeding 99% in human presence detection. **Conclusion:** Collaborative manufacturing requires integrated frameworks that articulate regulatory safety, cognitive ergonomics, sustainability, and technological ethics as necessary conditions for effective, worker-centered implementation. **General area of study:** Industrial automation and robotics. **Specific area of study:** Human-robot collaborative systems in flexible manufacturing environments.

**Keywords:** collaborative robots, flexible manufacturing, human-robot safety, human-robot interaction, ISO/TS 15066.

## Resumen

**Introducción:** La irrupción de los robots colaborativos (cobots) en entornos de manufactura flexible constituye uno de los fenómenos tecnológicos más relevantes de la Industria 4.0 y 5.0, transformando radicalmente la relación entre operarios humanos y sistemas automatizados en los espacios de producción compartidos. La convergencia de inteligencia artificial, visión por computadora, sensórica avanzada y marcos normativos como la ISO/TS 15066 ha abierto un campo de investigación multidisciplinario en el que la seguridad, la ergonomía y la eficiencia productiva constituyen ejes articuladores inseparables. **Objetivo:** Se analiza el estado actual del conocimiento sobre robots colaborativos en entornos de manufactura flexible, con énfasis en los sistemas de seguridad, las interfaces humano-robot y la optimización de celdas de trabajo, identificando tendencias, avances y brechas existentes en la literatura científica. **Metodología:** Se llevó a cabo una

investigación bibliográfica con enfoque descriptivo y método análisis-síntesis, mediante una revisión no sistemática de 43 fuentes científicas indexadas publicadas preferentemente entre 2024 y 2026, empleando palabras clave como cobots, manufactura flexible, HRI, ISO/TS 15066 y detección de presencia. **Resultados:** Se identificaron cuatro dimensiones temáticas centrales: sistemas de seguridad y normativa, interfaces humano-robot multimodales, optimización de celdas colaborativas y arquitecturas de control adaptativo. Los cobots reducen tiempos de ensamblaje hasta un 30% y errores operativos en igual proporción, mientras que la integración de sensores visuales y algoritmos YOLO alcanza precisiones superiores al 99% en detección de presencia humana. **Conclusión:** La manufactura colaborativa requiere marcos integrados que articulen seguridad normativa, ergonomía cognitiva, sostenibilidad y ética tecnológica como condiciones necesarias para una implementación eficaz y centrada en el trabajador. **Área de estudio general:** Automatización y robótica industrial. **Área de estudio específica:** Sistemas colaborativos humano-robot en entornos de manufactura flexible.

**Palabras claves:** robots colaborativos, manufactura flexible, seguridad humano-robot, interacción humano-robot, ISO/TS 15066.

## Introducción

La manufactura moderna atraviesa una transformación estructural sin precedentes, impulsada por la convergencia de tecnologías digitales, sistemas ciberfísicos y una creciente demanda de flexibilidad productiva. En este contexto, los robots colaborativos, denominados cobots, han emergido como una categoría tecnológica distintiva, que redefine los paradigmas tradicionales de automatización industrial, para una coexistencia segura, eficiente y ergonómicamente viable, entre operarios humanos y sistemas robóticos en espacios de trabajo compartidos. A diferencia de los robots industriales convencionales, que operan en celdas segregadas por barreras físicas rígidas, los cobots están diseñados para percibir, interpretar y responder en tiempo real, a la presencia y las acciones del ser humano, abriendo un espectro amplio de aplicaciones en ensamblaje, desensamblaje, inspección, logística interna y tareas de asistencia ergonómica [1].

El mercado global de robótica industrial, valorado en 54.200 millones de dólares en 2023, proyecta una tasa de crecimiento anual compuesta del 11,4% hasta 2030, impulsada principalmente por la adopción de cobots en sectores como: la industria automotriz, electrónica, alimentaria y de la construcción [2]. Este crecimiento no es meramente cuantitativo: implica una reconfiguración profunda de los entornos productivos, que demanda soluciones técnicas, normativas y organizacionales integradas. La transición desde la Industria 4.0, centrada en la automatización inteligente y la conectividad digital, hacia el paradigma emergente de la Industria 5.0, que sitúa al ser humano en el centro del ecosistema productivo, ha otorgado una relevancia renovada a la investigación sobre colaboración

humano-robot (HRC), entendida no solo como un problema de ingeniería, sino como una cuestión sociotécnica de primera magnitud [3].

Desde una perspectiva técnica, la seguridad constituye el eje fundacional de cualquier sistema colaborativo. La norma internacional ISO/TS 15066:2016, complementada por la ISO 10218-2:2011, y la emergente PD ISO/PAS 5672:2023, establece los límites biomecánicos permisibles, para el contacto entre robots y operarios humanos, definiendo cuatro modos de colaboración: parada de seguridad monitorizada, guiado manual, monitoreo de velocidad y separación (SSM), y limitación de potencia y fuerza (PFL) [4]. Estos marcos normativos han estimulado una producción científica significativa, orientada a desarrollar sistemas de detección de presencia, modelado de colisiones y arquitecturas de control, capaces de garantizar el cumplimiento de los umbrales establecidos en condiciones industriales reales [5]. Estudios recientes han demostrado que, algoritmos de visión como YOLO V5 alcanzan precisiones del 99,9% en detección de operarios, procesando fotogramas en apenas 0,0089 segundos, lo cual resulta técnicamente viable para implementaciones industriales, que requieren latencias inferiores a los 50 milisegundos [6].

La interfaz humano-robot (HRI) constituye otro eje de investigación de creciente relevancia, en el que la ergonomía cognitiva, la usabilidad y la aceptación tecnológica ocupan un lugar central. Las interfaces tradicionales basadas en paneles de programación táctil, están siendo desplazadas por modalidades multimodales, que integran gestos manuales, voz, seguimiento ocular, realidad aumentada y realidad mixta, reduciendo significativamente la carga cognitiva del operario, y democratizando el acceso a la robótica colaborativa, para trabajadores sin formación técnica especializada [7]. El sistema CobRA, por ejemplo, combina visión por computadora, cámara RGB-D y captura de gestos, para que los operadores sin conocimientos de programación configuren cobots de forma intuitiva, logrando una precisión de detección del 93% con el robot ABB YuMi [8]. En esta línea, Billing et al. [9] sostienen que, el éxito de la industria del futuro no depende exclusivamente de la precisión técnica, sino de la integración armoniosa entre trabajadores y máquinas mediada por interfaces, que actúen como extensiones de las capacidades humanas.

La optimización de celdas de trabajo colaborativas, representa la tercera dimensión estructural de este campo de investigación. El diseño eficiente de una celda colaborativa, implica la articulación de múltiples variables: la asignación dinámica de tareas entre el operario y el robot, la planificación de trayectorias seguras en tiempo real, la gestión de zonas de trabajo compartidas, y el monitoreo continuo del estado del sistema. Investigaciones recientes han propuesto arquitecturas basadas en ROS2, que implementan el escenario SSM conforme a la ISO/TS 15066, ajustando la velocidad del robot de forma gradual y continua entre 0% y 100%, en función del riesgo real calculado, lo que evita paradas innecesarias, y maximizar la productividad sin sacrificar la seguridad [10]. Asimismo, enfoques de prototipado virtual, que integran modelado CAD y simulación multicuerpo en entornos

MATLAB/Simulink, han demostrado ser herramientas eficaces, para verificar el cumplimiento de requisitos de seguridad antes de la implementación física, confirmando que, las fuerzas de contacto durante colisiones accidentales, se mantienen por debajo del límite de 65 N establecido por la norma ISO/TS 15066 [11].

La dimensión del control adaptativo en sistemas colaborativos, ha experimentado un desarrollo acelerado, impulsado por la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. Los sistemas adaptativos son capaces de ajustar en tiempo real, parámetros de movimiento, tareas y control en respuesta a la variabilidad humana, siendo los parámetros de movimiento: trayectoria, velocidad y fuerza, los más frecuentemente abordados en la literatura, representando el 51% de los estudios revisados en esta área [12]. El control de impedancia variable, que modela la interacción mecánica entre robot y operario, como una relación dinámica de masa, amortiguamiento y rigidez, ha evolucionado desde modelos lineales tradicionales, hacia enfoques que incorporan lógica difusa de orden fraccionario y aprendizaje por refuerzo, para una gestión más sofisticada de la incertidumbre y la no linealidad, propias de los entornos colaborativos dinámicos [13].

La ciberseguridad constituye una dimensión emergente y crítica en los sistemas de manufactura colaborativa. La integración de cobots en redes industriales conectadas, los expone a vulnerabilidades propias de los sistemas ciberfísicos: ataques a protocolos de comunicación, manipulación de actualizaciones remotas, y explotación de componentes de inteligencia artificial embebidos. Dado que, estos sistemas operan en estrecha proximidad con personas, cualquier compromiso de seguridad informática, puede traducirse en daños físicos reales, lo que hace imprescindible que, la ciberseguridad sea considerada un requisito de diseño fundamental y no un añadido posterior [14]. Esta preocupación es coherente con los hallazgos de revisiones de alcance recientes, que identifican que, más del 50% de los estudios sobre robots humanoides en entornos cotidianos, carecen de referencias a normas específicas de seguridad, evidenciando un rezago regulatorio significativo frente al ritmo de avance tecnológico [15].

Las dimensiones éticas y sociales de la colaboración humano-robot, han adquirido una presencia creciente en la literatura científica, especialmente en el contexto de la Industria 5.0. El marco "Trust by Design" propuesto por Merchán-Cruz et al. [16] integra principios éticos de transparencia, privacidad, equidad, responsabilidad y seguridad, en cada etapa del ciclo de vida de los sistemas colaborativos, alineándose con la Ley de Inteligencia Artificial de la Unión Europea, y el Reglamento General de Protección de Datos. Estas consideraciones son especialmente relevantes, en el contexto de las pequeñas y medianas empresas, para las cuales los altos costos de implementación robótica, representan una barrera de acceso significativa. Propuestas como el retrofitting, transformación de robots industriales convencionales en cobots, mediante la incorporación de módulos de percepción, seguridad e

interacción adaptativa, emergen como estrategias viables, para democratizar el acceso a la robótica colaborativa, sin incurrir en los costos de sustitución de equipos aún funcionales [1].

La taxonomía de los manipuladores industriales inteligentes, ha evolucionado igualmente hacia clasificaciones multidimensionales, que integran aspectos mecánicos, computacionales, perceptuales y regulatorios, superando enfoques previos, que trataban estas dimensiones de forma aislada. Entre los avances más destacados, se encuentran los actuadores de rigidez variable, los gemelos digitales para simulación y validación, y los sistemas de fusión multimodal de sensores, que combinan cámaras de profundidad, LiDAR, sensores inerciales y sistemas táctiles [17]. Kumar Tyagi [18] destaca que, la integración de estas tecnologías en el contexto de la manufactura inteligente, requiere no solo avances técnicos, sino también arquitecturas de software robustas, protocolos de interoperabilidad estandarizados y estrategias formativas, para que los equipos humanos se adapten a los nuevos entornos productivos.

Es por eso que, la presente investigación sintetiza el conocimiento disperso en la literatura científica reciente, sobre robótica colaborativa en manufactura flexible, identificando las tendencias consolidadas, los desafíos no resueltos, y las líneas de investigación emergentes, que configurarán el desarrollo de este campo en los próximos años. El análisis se estructura en torno a tres ejes temáticos complementarios: los sistemas de seguridad y su marco normativo, las interfaces humano-robot multimodales, y la optimización de celdas de trabajo colaborativas, articulados transversalmente por las dimensiones de control adaptativo, ciberseguridad y ética tecnológica.

### **Metodología**

La presente investigación se desarrolló bajo un nivel descriptivo, orientado a caracterizar y analizar el estado actual del conocimiento sobre robots colaborativos en entornos de manufactura flexible, con especial énfasis en los sistemas de seguridad, las interfaces humano-robot, y la optimización de celdas de trabajo. Con este enfoque se identificó las principales tendencias, avances tecnológicos y desafíos presentes en la literatura científica y técnica disponible, sin la necesidad de manipular variables ni realizar experimentos directos.

El método empleado fue el de análisis-síntesis, mediante el cual, se descompusieron los contenidos revisados en sus elementos fundamentales, para comprender en profundidad cada uno de los aspectos abordados y, posteriormente, se integraron de manera coherente, para construir una visión global y articulada del tema. Este proceso estableció relaciones entre los distintos componentes, que conforman los sistemas de manufactura colaborativa, así como identificar convergencias y brechas en el conocimiento existente.

Para la recopilación de información, se recurrió a la investigación bibliográfica como estrategia principal, consultando fuentes documentales de carácter científico, técnico y

académico. Se revisaron artículos de revistas indexadas, libros especializados, informes técnicos, normas internacionales y documentos institucionales, relacionados con la robótica colaborativa y la manufactura flexible. Las bases de datos utilizadas incluyeron IEEE Xplore, Springer Link, MDPI, ScienceDirect, Taylor & Francis y Google Books, plataformas académicas de reconocido prestigio internacional.

El proceso de búsqueda y selección de fuentes, se realizó a través de una revisión no sistemática de la literatura, lo que otorgó flexibilidad para explorar el tema desde múltiples perspectivas y disciplinas, sin estar sujeto a protocolos rígidos de inclusión o exclusión. Esta modalidad resultó apropiada dado el carácter amplio y multidimensional del objeto de estudio, para incorporar tanto publicaciones clásicas de referencia como desarrollos recientes en el campo, con preferencia por fuentes publicadas entre 2024 y 2026.

Las palabras clave empleadas durante el proceso de búsqueda fueron: *robots colaborativos, cobots, manufactura flexible, seguridad humano-robot, interfaces humano-robot, HRI (Human-Robot Interaction), celdas de trabajo colaborativas, optimización de procesos de manufactura, ISO/TS 15066, automatización industrial y sistemas de detección de presencia*. Estos términos se utilizaron tanto de forma individual como en combinaciones booleanas, en español e inglés, con el fin de ampliar el alcance y la pertinencia de los resultados obtenidos

## Resultados

### A) Categorías y dimensiones de la investigación sobre cobots en manufactura flexible

A través de la revisión de la literatura se identificó que, los robots colaborativos en entornos de manufactura flexible, se organiza en torno a un conjunto estructurado de categorías temáticas y dimensiones analíticas que, si bien guardan una estrecha interrelación, pueden diferenciarse por sus objetivos, metodologías y métricas de evaluación propias. La seguridad normativa y física, constituye la categoría con mayor volumen de producción científica, seguida de las interfaces y la interacción humano-robot, la optimización de celdas y el control adaptativo. Estas categorías se despliegan a su vez en dimensiones específicas, que evidencian la complejidad multidisciplinaria del campo, y la necesidad de enfoques integrados, que superen las aproximaciones unidimensionales predominantes previo a 2020. La Tabla 1 y Figura 1 sistematiza esta estructura categorial y dimensional.

Tabla 1. Categorías temáticas y dimensiones analíticas en la investigación sobre cobots en manufactura flexible

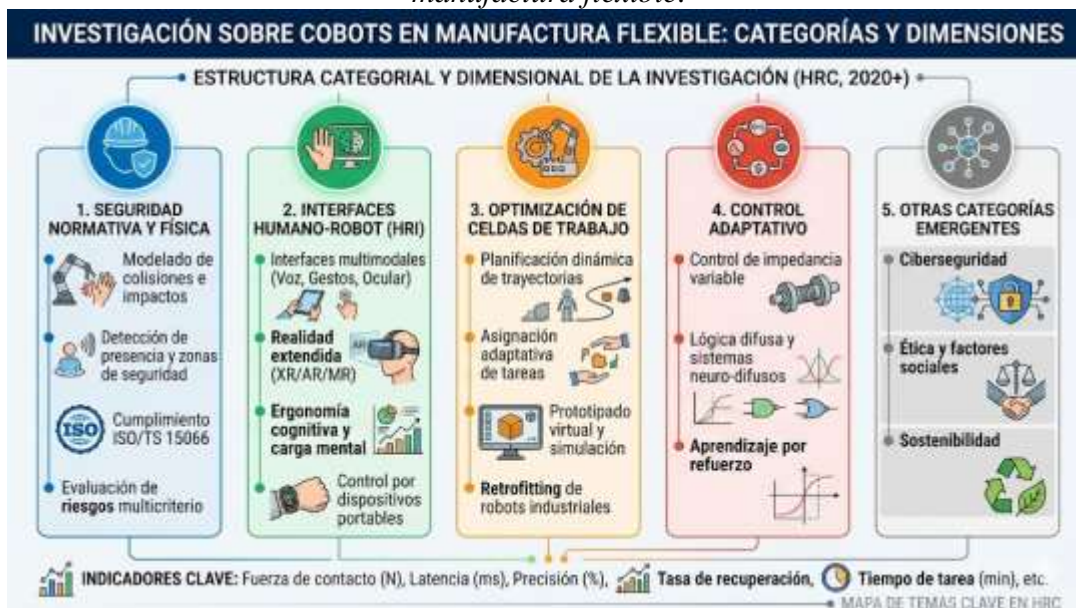
Categoría principal	Dimensión	Descripción	Indicadores clave	Referencias representativas
Seguridad normativa y física	Modelado de colisiones e impactos	Desarrollo de modelos biomecánicos y computacionales para simular y evaluar fuerzas de contacto entre robot y operario	Fuerza de contacto (N), coeficiente de restitución, R <sup>2</sup> del modelo	[4], [5], [11]

	Detección de presencia y zonas de seguridad	Sistemas de percepción para identificar la posición y movimiento del operario en tiempo real	Precisión de detección (%), latencia (ms), cobertura espacial	[6], [10], [19]
	Cumplimiento ISO/TS 15066	Validación de sistemas colaborativos respecto a los cuatro modos de colaboración definidos por la norma	Modo SSM, límite PFL (65 N), distancia mínima de separación	[20], [4], [10], [11]
	Evaluación de riesgos multicriterio	Metodologías formales para identificar, priorizar y mitigar riesgos en entornos HRC	Peso de criterios (AHP/VIKOR), confiabilidad humana y robótica	[21], [22]
Interfaces humano-robot (HRI)	Interfaces multimodales	Sistemas que integran voz, gestos, seguimiento ocular y realidad mixta para el control del cobot	Puntuación SUS, NASA-TLX, latencia de respuesta	[7], [8], [23], [24]
	Realidad extendida (XR/AR/MR)	Aplicación de dispositivos HMD para visualizar, programar y supervisar cobots en entornos inmersivos	Tiempo de tarea (min), usabilidad, precisión de calibración	[7], [25]
	Ergonomía cognitiva y carga mental	Evaluación del impacto de la interacción humano-robot sobre la carga cognitiva, el bienestar y la autonomía del operario	EEG, seguimiento ocular, RULA/OWAS, escala NASA-TLX	[26], [9], [27]
	Control por dispositivos portables	Uso de smartwatches, guantes hápticos y sensores IMU como interfaz de control robótico	Latencia (<200 ms), correlación de movimiento, curva de aprendizaje	[24]
Optimización de celdas de trabajo	Planificación dinámica de trayectorias	Algoritmos de generación y adaptación de rutas del robot en presencia de obstáculos dinámicos	Tiempo de planificación (ms), energía de trayectoria, margen de seguridad	[25], [28]
	Asignación adaptativa de tareas	Mecanismos de distribución dinámica de sub tareas entre el operario y el robot según estado del sistema	Tareas/minuto, tasa de colisiones, reducción de fatiga (%)	[12], [29]
	Prototipado virtual y simulación	Metodologías CAD y simulación multicuerpo para diseñar y verificar celdas colaborativas antes de su implementación	Número de iteraciones, cumplimiento de requisitos, precisión del modelo	[11], [30]
	Retrofitting de robots industriales	Transformación de robots convencionales en cobots mediante módulos de percepción y seguridad añadidos	Costo de conversión, escalabilidad, impacto ambiental	[1]
Control adaptativo	Control de impedancia variable	Regulación dinámica de la rigidez, masa y amortiguamiento robóticos para gestionar el contacto físico	Parámetros de impedancia, error de seguimiento, estabilidad	[13]
	Lógica difusa y sistemas neuro-difusos	Aplicación de razonamiento bajo incertidumbre para control robusto en entornos dinámicos	Error de trayectoria, tiempo de respuesta, adaptabilidad	[31]
	Aprendizaje por refuerzo	Optimización autónoma del comportamiento robótico mediante interacción con el entorno	Recompensa acumulada, tasa de convergencia, tasa libre de colisiones	[29]
Ciberseguridad	Vulnerabilidades en cobots conectados	Identificación de vectores de ataque en sistemas robóticos integrados en redes industriales	Tipos de vulnerabilidades, protocolos afectados, impacto potencial	[14]
Ética y factores sociales	Confianza y aceptación tecnológica	Análisis de la disposición de los trabajadores para colaborar con robots y las condiciones que la favorecen	Escala de confianza, intención de uso, percepción de autonomía	[16], [27]
	Marcos éticos para IA colaborativa	Integración de principios éticos en el diseño de sistemas de colaboración humano-robot	Transparencia, equidad, privacidad, responsabilidad	[16]
Sostenibilidad	Economía circular y remanufactura	Aplicación de cobots en procesos de desensamblaje y recuperación de componentes con valor reutilizable	Tasa de recuperación, reducción de residuos, impacto ambiental	[20], [6], [32], [33]

*Nota: Tabla creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*



Figura 1.  
Categorías temáticas y dimensiones analíticas en la investigación sobre cobots en manufactura flexible.



*Nota: Figura creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*

## B) Equipos necesarios para la implementación de sistemas colaborativos en manufactura flexible

La implementación de una celda de manufactura colaborativa, requiere la integración de un ecosistema tecnológico complejo, que comprende hardware robótico, sistemas de percepción, infraestructura de comunicación, dispositivos de interfaz y plataformas de software. La selección y dimensionamiento adecuado de estos componentes resulta determinante, para garantizar el cumplimiento de los requisitos de seguridad establecidos por la norma ISO/TS 15066, así como para alcanzar los niveles de productividad y ergonomía esperados. La literatura revisada evidencia que, no existe una solución universal: la configuración óptima depende del tipo de tarea colaborativa, la tipología del espacio de trabajo, las características del operario, y los objetivos específicos del proceso productivo. Sin embargo, es posible identificar categorías de equipamiento, que resultan transversales a la mayoría de las implementaciones documentadas, las cuales se sistematizan en la Tabla 2 y Figura 2.

Tabla 2. Equipos necesarios para la implementación de sistemas cobots en entornos de manufactura flexible.

Categoría de equipo	Componente específico	Función en el sistema colaborativo	Ejemplos comerciales documentados	Referencias
Plataforma robótica	Cobot de 6 ejes de fuerza limitada	Manipulación de piezas, ensamble, inspección y desensamble en espacio compartido con el operario	Universal Robots UR5e, UR10e; KUKA LBR iiwa 14; ABB YuMi	[10], [5], [7]
Plataforma robótica	Cobot de doble brazo	Tareas de manipulación bimanual que requieren coordinación entre dos efectores finales	ABB GoFa 12	[30]

Plataforma robótica	Robot móvil colaborativo (AMR+cobot)	Desplazamiento autónomo en planta con capacidad de manipulación colaborativa	Omron AMR integrado con cobot	[11]
Percepción visual	Cámara RGB-D (profundidad)	Detección de presencia humana, estimación de pose y planificación de trayectorias en 3D	Intel RealSense L515, D435	[6], [8], [19]
Percepción visual	Sistema de visión estereoscópica	Reconstrucción tridimensional del entorno de trabajo para detección de obstáculos	Cámaras estereoscópicas industriales	[19]
Percepción visual	Cámara TOF (Time of Flight)	Medición de distancias con alta velocidad de muestreo para SSM en tiempo real	Cámaras TOF industriales	[19]
Percepción ambiental	Escáner LiDAR 2D/3D	Monitoreo de zonas de seguridad y detección de intrusiones en el área de trabajo	SICK, Hokuyo	[34], [19]
Percepción ambiental	Sensores de gas y llama	Detección de agentes tóxicos y riesgos de incendio en entornos de desensamblaje de residuos electrónicos	MQ-135, KY-026	[35]
Percepción táctil y de fuerza	Sensor de torque/fuerza en muñeca	Medición de fuerzas de contacto para control de impedancia y detección de colisiones	ATI Mini45, sensores integrados KUKA	[5], [13]
Percepción táctil y de fuerza	Piel electrónica (e-skin)	Detección de proximidad distribuida en la superficie del robot para gestión de contacto	Sistemas e-skin de investigación	[36]
Sensores inerciales	IMU (Unidad de Medición Inercial)	Seguimiento del movimiento del operario para estimación de intención y estado postural	IMUs vestibles, Xsens	[34], [24]
Sistema de seguimiento	Sistema de captura de movimiento óptico	Seguimiento de alta precisión del operario en el espacio de trabajo para SSM	OptiTrack (precisión 0,2 mm)	[10]
Interfaz de usuario	Dispositivo de realidad mixta (HMD)	Visualización de información contextual y control multimodal del cobot en el espacio físico	Microsoft HoloLens 2	[7]
Interfaz de usuario	Gafas de seguimiento ocular	Captura de la dirección de la mirada del operario para selección de objetivos robóticos	Gafas de eye-tracking industriales	[23]
Interfaz de usuario	Smartwatch con giroscopio/acelerómetro	Control gestual del cobot mediante movimientos de muñeca del operario	Xiaomi Mi Band Pro	[24]
Interfaz de usuario	Sensor de captura de gestos manuales	Reconocimiento de gestos de la mano para programación intuitiva del cobot	Leap Motion Controller	[8]
Infraestructura de software	Middleware robótico (ROS2)	Gestión de la comunicación entre módulos de percepción, control y seguridad	ROS2 (Robot Operating System 2)	[10], [7]
Infraestructura de software	Plataforma de simulación	Validación virtual de celdas colaborativas y algoritmos de control antes de la implementación física	MATLAB/Simulink, RoboDK, Gazebo	[29], [11]
Infraestructura de software	Sistema de visión artificial (algoritmos)	Detección, segmentación y seguimiento de objetos y personas en tiempo real	YOLOv5, YOLOv8, YOLOv11, Faster R-CNN	[6], [7], [37]
Infraestructura de cómputo	Unidad de procesamiento embebida con GPU	Ejecución de algoritmos de IA en el borde para latencias inferiores a 50 ms	NVIDIA Jetson, Intel NUC	[19]
Infraestructura de red	Red industrial de comunicación en tiempo real	Transmisión de datos de sensores y comandos de control con garantías de latencia	EtherCAT, PROFINET, 5G industrial	[14]
Seguridad hardware	Dispositivo de parada de emergencia	Interrupción inmediata del movimiento robótico ante detección de intrusión en zona de peligro	E-stop certificado PLd/Cat3	[6], [10]
Seguridad hardware	Escáner de área de seguridad	Definición y monitoreo de zonas de trabajo seguras con respuesta en tiempo real	SICK S300, S3000	[34]

*Nota: Tabla creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*

Figura 2.  
Equipos necesarios para la implementación de sistemas cobots en entornos de manufactura flexible.



*Nota: Figura creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*

### C) Análisis económico para la implementación de sistemas colaborativos

El análisis económico de la implementación de cobots en entornos de manufactura flexible, constituye uno de los factores determinantes para la toma de decisiones, en los departamentos de ingeniería e inversión industrial, especialmente en el contexto de las pequeñas y medianas empresas (PYMEs), que representan la mayoría del tejido productivo global. Los costos de adquisición de un cobot oscilan típicamente entre 25.000 y 80.000 USD, dependiendo de la tipología, el alcance y la capacidad de carga, pero los costos totales de implementación, que incluyen integración, sensórica, software, formación y adecuaciones de planta, pueden multiplicar fácilmente este valor por un factor de dos a cuatro. Frente a estos costos, los beneficios incluyen la reducción de tiempos de ciclo de hasta un 30%, la disminución de errores en igual proporción, la reducción de accidentes laborales y la mejora de la ergonomía, factores que se traducen en retornos de inversión típicamente situados entre 18 y 36 meses en aplicaciones bien diseñadas. La Tabla 3 y Figura 3 ofrece una estimación orientativa de los principales componentes de costo y beneficio.

Tabla 3. Análisis económico orientativo para la implementación de cobots en manufactura flexible.

Componente	Descripción	Costo estimado (USD)	Observaciones
<b>COSTOS DE INVERSIÓN INICIAL</b>			
Plataforma robótica (cobot)	Unidad robótica colaborativa de 6 ejes, 5–16 kg de carga útil	25.000 – 80.000	Varía según marca (UR, KUKA, ABB, Fanuc) y capacidad
Sistema de visión por computadora	Cámara RGB-D, procesador embebido, software de visión	3.000 – 15.000	Incluye Intel RealSense o equivalente y GPU embebida

Sensores de seguridad	Escáner LiDAR, sensores de fuerza/torque, e-stop certificado	5.000 – 20.000	Requisito para certificación ISO/TS 15066
Interfaz HRI (básica)	Panel táctil o sistema de gestos básico	1.000 – 5.000	Interfaces avanzadas (HoloLens, eye-tracking) elevan este costo
Interfaz HRI (avanzada, XR/MR)	HoloLens 2 u HMD equivalente + integración	15.000 – 35.000	Opcional; alta mejora en usabilidad y ergonomía cognitiva
Software de control y simulación	Licencias ROS2, RoboDK, MATLAB/Simulink, gemelo digital	5.000 – 25.000	Costos de licencia anuales o únicos según proveedor
Adecuación de planta e instalación	Modificaciones estructurales, cableado, iluminación industrial	8.000 – 30.000	Depende del estado previo de la instalación
Efector final (gripper) adaptativo	Pinza multifuncional, gripper neumático o eléctrico	2.000 – 12.000	Los grippers adaptativos para superficies irregulares son más costosos
<b>Subtotal inversión inicial (rango típico)</b>		<b>64.000 – 222.000</b>	Para una celda colaborativa completa con un cobot
<b>COSTOS OPERATIVOS ANUALES</b>			
Mantenimiento preventivo y correctivo	Servicio técnico especializado, repuestos	3.000 – 8.000/año	Aproximadamente 5–10% del costo del equipo
Actualización de software y licencias	Actualizaciones de seguridad, nuevas funcionalidades	1.500 – 5.000/año	Especialmente relevante para módulos de IA y visión
Formación continua del personal	Capacitación en operación, programación y mantenimiento	2.000 – 6.000/año	Reducción de costos con curvas de aprendizaje positivas
Consumo energético	Operación continua del cobot y periféricos	500 – 2.000/año	Los cobots son significativamente más eficientes que robots industriales tradicionales
Ciberseguridad	Auditorías, parches de seguridad, monitoreo de red	1.000 – 4.000/año	Costo creciente por expansión de superficie de ataque en cobots conectados
<b>Subtotal costos operativos anuales</b>		<b>8.000 – 25.000/año</b>	
<b>BENEFICIOS ECONÓMICOS ESTIMADOS</b>			
Reducción de tiempos de ensamblaje	Hasta 30% de reducción en tiempo de ciclo	Equivalente a 15.000–60.000/año	Depende del volumen productivo y costo de mano de obra
Reducción de errores y retrabajos	Hasta 30% de mejora en calidad	Equivalente a 8.000–30.000/año	Reducción de scrap, garantías y devoluciones
Reducción de accidentes laborales	Disminución de incidentes músculo-esqueléticos y accidentes	Equivalente a 5.000–20.000/año	Reducción de costos médicos, seguros y ausentismo
Flexibilidad productiva	Capacidad de reconfiguración rápida para productos diferentes	Difícil de cuantificar directamente	Valor estratégico en mercados de alta variabilidad
Ahorro por retrofitting vs. adquisición nueva	Estrategia de conversión de robots existentes	Ahorro del 40–60% respecto a adquisición nueva	Viable para robots industriales en funcionamiento [1]
<b>Período de retorno de inversión (ROI) estimado</b>		<b>18 – 36 meses</b>	Para implementaciones bien diseñadas en medianas empresas
<b>ANÁLISIS DE VIABILIDAD SEGÚN TAMAÑO DE EMPRESA</b>			
Gran empresa (>250 empleados)	Alta viabilidad; ROI acelerado por volumen productivo	ROI: 12–24 meses	Acceso a financiamiento y economías de escala
Mediana empresa (50–250 empleados)	Viabilidad moderada-alta con selección cuidadosa de aplicación	ROI: 24–36 meses	Cobots de gama media (UR, Doosan) más adecuados
Pequeña empresa (<50 empleados)	Viabilidad condicionada a subvenciones o retrofitting	ROI: 36–60 meses	Estrategias de cobot-as-a-service o retrofitting recomendadas [1]

*Nota: Tabla creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*



Figura 3.

Análisis económico orientativo para la implementación de cobots en manufactura flexible.



Nota: Figura creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.

#### D) Tecnologías y técnicas de implementación futuras

La trayectoria de desarrollo de la robótica colaborativa en los próximos cinco a diez años, apunta hacia la convergencia de múltiples tecnologías emergentes, que transformarán sustancialmente las capacidades, la accesibilidad y el impacto de los cobots, en los entornos de manufactura flexible. Entre las tendencias más consolidadas en la literatura científica reciente destacan: la integración de modelos fundacionales de inteligencia artificial, como los transformadores visión-lenguaje, para dotar a los cobots de capacidades de comprensión semántica del entorno; el desarrollo de sistemas de IA explicable (XAI), para que los operarios comprendan y supervisen las decisiones autónomas del robot; la expansión de la conectividad 5G y 6G, para habilitar sistemas colaborativos distribuidos con garantías de latencia ultra-baja; y el avance de la robótica blanda y los actuadores de rigidez variable, para mejorar la seguridad intrínseca del contacto físico. La sistematización de estas tendencias en la Tabla 4 y Figura 4 donde se visualiza el horizonte tecnológico de la manufactura colaborativa.

Tabla 4. Tecnologías y técnicas de implementación futura para cobots en manufactura flexible.

Tecnología/Técnica	Descripción	Estado actual	Impacto esperado	Horizonte temporal	Referencias
Modelos fundacionales visión-lenguaje	Transformadores multimodales capaces de entender instrucciones en lenguaje natural y ejecutar tareas visualmente complejas	Emergente en laboratorio	Programación de cobots por lenguaje natural; reducción drástica de tiempo de configuración	3-5 años	[37]

IA explicable (XAI) en control colaborativo	Sistemas que justifican en tiempo real las decisiones autónomas del robot al operario	Identificado como brecha crítica	Mayor confianza del operario; supervisión efectiva; cumplimiento normativo	2–4 años	[12], [16]
Aprendizaje autodirigido (self-supervised)	Cobots capaces de adquirir nuevas habilidades sin supervisión humana explícita mediante exploración del entorno	Investigación activa	Reducción drástica de tiempo de programación; adaptación a nuevos productos	4–7 años	[37]
Gemelos digitales adaptativos	Réplicas virtuales del sistema colaborativo que se actualizan en tiempo real con datos del sistema físico	En implementación industrial	Optimización continua de la celda; mantenimiento predictivo; validación normativa virtual	1–3 años	[18], [17]
Robótica blanda y actuadores de rigidez variable	Estructuras robóticas deformables y articulaciones con rigidez programable que mejoran la seguridad intrínseca del contacto	Investigación avanzada	Eliminación de riesgo de daño físico en contacto; mayor versatilidad en manipulación	3–6 años	[17], [13]
Conectividad 5G/6G industrial	Redes inalámbricas de ultra-baja latencia y alta fiabilidad para cobots distribuidos y coordinación multiagente	5G: disponible; 6G: investigación	Sincronización de múltiples cobots; control remoto en tiempo real; reducción de cableado	5G: 1–2 años; 6G: 7–10 años	[18]
Estimación monocular de profundidad con IA	Algoritmos que infieren información tridimensional a partir de una sola cámara estándar	Emergente	Reducción de costo de sensórica SSM; sistemas más compactos y accesibles	2–4 años	[19]
Sensores vestibles de biofeedback	Dispositivos portados por el operario que monitorizan fatiga, estrés y ergonomía en tiempo real	Validado como óptimo en Industria 5.0	Asignación adaptativa de tareas basada en estado fisiológico; prevención de lesiones	1–3 años	[21], [29]
Cobots colaborativos accionados por cables (CDPRs)	Plataformas de gran espacio de trabajo y alta capacidad de carga para tareas colaborativas de transporte	Prototipado experimental	Aplicaciones logísticas y de construcción; alta flexibilidad de configuración	4–8 años	[38]
Aprendizaje por imitación y transferencia	Técnicas por las que el cobot aprende de demostraciones humanas directas y transfiere el conocimiento entre tareas	Investigación activa	Reducción del tiempo de programación; adaptación a variaciones del producto	2–5 años	[33]
Interfaces cerebro-máquina (BCI) pasivas	Interfaces que interpretan señales EEG del operario para inferir intención y carga cognitiva sin acción explícita	Investigación básica	Control intuitivo avanzado; supervisión del estado mental del operario	7–12 años	[26]
Cobots con autonomía semántica	Robots capaces de comprender el contexto de la tarea, los roles y las intenciones del operario sin programación explícita	Emergente	Colaboración verdaderamente natural; adaptación a cambios no anticipados	5–10 años	[37], [39]
Estándares armonizados internacionales	Marcos normativos globales que unifiquen ISO, IEC e IEEE para cobots en todos los sectores industriales	En desarrollo activo	Reducción de barreras de certificación; interoperabilidad entre proveedores	3–6 años	[17], [15]
Cobot-as-a-Service (CaaS)	Modelos de negocio que ofrecen cobots por suscripción, eliminando la barrera de inversión inicial	Emergente comercialmente	Democratización del acceso para PYMEs; reducción del riesgo de inversión	1–3 años	[1], [2]

*Nota: Tabla creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*

Figura 4.

*Tecnologías y técnicas de implementación futura para cobots en manufactura flexible.*



*Nota: Figura creada a través de la información recopilada de fuentes bibliográficas.*

## Discusión

Los resultados obtenidos en la presente revisión permiten una discusión articulada en torno a cuatro ejes temáticos fundamentales: la evolución y estado actual de los sistemas de seguridad en entornos colaborativos, el desarrollo de las interfaces humano-robot y su impacto en la ergonomía y la productividad, la optimización de celdas de trabajo y los modelos de control adaptativo, y finalmente las dimensiones transversales de ciberseguridad, sostenibilidad y ética tecnológica que condicionan el desarrollo futuro del campo.

## Sistemas de seguridad: entre la norma y la práctica

La norma ISO/TS 15066:2016 constituye el referente regulatorio central de la robótica colaborativa, pero su implementación en entornos industriales reales, continúa presentando desafíos técnicos y metodológicos significativos. Fernandez-Vega et al. [1] identifican que, los marcos de retrofitting modular, pueden incorporar el cumplimiento de esta norma como una capa funcional explícita, lo que resulta prometedor para la actualización del parque robótico existente, sin necesidad de sustitución completa. Sin embargo, la validación empírica de estas propuestas en condiciones industriales reales, sigue siendo una brecha relevante. En esta línea, los trabajos de Caneschi et al. [5] sobre la dinámica de impacto con el manipulador KUKA LBR iiwa, aportan evidencia experimental valiosa al demostrar que, los modelos de Árbol de Decisión ofrecen una precisión predictiva de  $R^2 = 0,92$  con tiempos de inferencia inferiores a 0,1 milisegundos, lo que los posiciona como herramientas viables para la evaluación de riesgos en tiempo real. Estos resultados son

complementarios con los hallazgos de la revisión sistemática de Samarathunga et al. [4], que analizó 98 publicaciones para concluir que, persiste una sobredependencia en modelos cuasiestáticos simplificados, y una escasa diversidad demográfica en los datos de referencia utilizados para definir umbrales biomecánicos.

La detección de presencia humana en tiempo real, representa la función de seguridad con mayor volumen de innovación tecnológica reciente. Alenjareghi et al. [6] demostraron que, el algoritmo YOLO V5 alcanza una precisión del 99,9% con un tiempo de procesamiento de 0,0089 segundos por fotograma, cumpliendo simultáneamente con las normas ISO 10218-2:2011 e ISO/TS 15066:2016. Este nivel de desempeño es consistente con el análisis de Adamides et al. [19], sobre las arquitecturas de percepción para SSM, que identifican a los sistemas multimodales, combinando cámaras de profundidad, LiDAR y visión térmica, como la configuración con mayor fiabilidad, aunque con la limitación de un mayor costo y complejidad computacional. La arquitectura SSM basada en ROS2 propuesta por Lettera et al. [10], que ajusta la velocidad del robot de forma continua y gradual en función del riesgo calculado mediante un filtro de Kalman lineal, ofrece una solución elegante a este dilema, evitando las paradas innecesarias asociadas a los enfoques de umbral binario.

El uso de la piel electrónica (e-skin), como mecanismo de percepción de proximidad distribuida en la superficie del robot, representa una alternativa tecnológica prometedora, que complementa los sistemas de visión externos. Xue et al. [36] proponen un método de coincidencia de estados, para distinguir con alta precisión entre datos de objetos intrusos, y los generados por el propio robot o el entorno, habilitando el control seguro de la velocidad a 0,5 m/s en escenarios colaborativos. Este enfoque es coherente con la revisión de Saleem et al. [34], que concluye que los sistemas visuales dominan la literatura con un 41,3% de uso, pero que la combinación multisensor ofrece la mayor fiabilidad, al compensar las limitaciones individuales de cada modalidad.

La evaluación de riesgos multicriterio ha recibido contribuciones metodológicas relevantes. Ayyildiz et al. [21] proponen un marco basado en lógica difusa esférica, que identifica a la integración de sensores vestibulares en tiempo real, como la estrategia de control adaptativo óptima, situándola por encima de alternativas como la visión por computadora aislada, o el control adaptativo basado exclusivamente en modelos. Bozkus y Kaya [22] complementan este enfoque, con una metodología que integra números Z y el método VIKOR, para evaluar riesgos en líneas de producción automotriz reales, identificando a la confiabilidad humana como el factor de riesgo más crítico, en entornos de colaboración humano-robot. Estas aproximaciones multicriterio resultan especialmente valiosas, para orientar las inversiones en sistemas de seguridad hacia los factores de mayor impacto, especialmente en contextos con recursos limitados.



## **Interfaces humano-robot: hacia la interacción natural**

La evolución de las interfaces humano-robot, desde los paneles de programación táctil, hacia sistemas multimodales de alta intuitividad, constituye uno de los avances más relevantes documentados en la literatura reciente. El sistema de realidad mixta basado en HoloLens 2 presentado por Calderón-Sesmero et al. [7], que logra una puntuación de usabilidad SUS de 79,67, y una carga cognitiva NASA-TLX de 27,68 en tareas de desensamblaje colaborativo, ilustra el potencial de estas tecnologías para democratizar el acceso a la robótica, sin requerir formación técnica especializada. Significativamente, los usuarios menos experimentados reportaron mayor usabilidad, lo que sugiere que, estas interfaces son especialmente beneficiosas para operarios sin experiencia previa en robótica.

El sistema CobRA aporta evidencia adicional en esta dirección al demostrar que, la combinación de visión por computadora, cámara RGB-D y captura de gestos mediante Leap Motion, facilita a operadores sin conocimientos técnicos, configurar el robot ABB YuMi con una precisión de detección del 93% [8]. En paralelo, el trabajo de Cazacu et al. [24] sobre el control de robots industriales mediante un smartwatch, logrando una latencia inferior a 200 ms y una correlación de 0,855 en el eje Z; amplía el espectro de dispositivos accesibles, para la interfaz robótica hacia el ámbito de los wearables de uso cotidiano. La exploración de la mirada ocular como mecanismo de control natural realizada por Quesada Díaz et al. [23] añade otra modalidad prometedora, aunque con la limitación de una sensibilidad a las variaciones de iluminación, que requerirá ser abordada antes de su adopción industrial generalizada.

Ofrecen un marco teórico comprehensivo Ioniță et al. [26], para entender la evolución de la interacción humano-máquina en el contexto de la Industria 5.0, destacando que, una HMI efectiva debe superar la mera usabilidad, para adoptar una filosofía centrada en el ser humano, que integre innovación tecnológica, sostenibilidad y personalización. Esta perspectiva es coherente con la obra de Billing et al. [9], que argumenta que, la carga mental, la confianza en la automatización y la conciencia situacional, son factores igualmente determinantes para la productividad y el bienestar del operario, que la precisión técnica del sistema robótico. La lógica difusa emerge en este contexto, como una herramienta especialmente adecuada, para modelar la incertidumbre inherente a las interacciones humano-robot, para interpretar intenciones humanas ambiguas en tiempo real, mediante variables lingüísticas y reglas condicionales [31].

El estudio de Rosen et al. [27] sobre las dimensiones del control de tareas en ensamblaje semiautomatizado, aporta evidencia empírica relevante sobre los factores psicológicos, que mediatizan la experiencia del operario en entornos colaborativos, concluyendo que, la combinación de margen temporal, metodológico y de decisión produce las experiencias laborales más positivas, y que los ciclos de trabajo más largos se asocian con mayor percepción de autonomía. Estos hallazgos son directamente relevantes para el diseño

de celdas colaborativas centradas en el trabajador, en línea con los principios de la Industria 5.0 articulados en el marco "Trust by Design"[16].

### **Optimización de celdas y control adaptativo**

La optimización de celdas de trabajo colaborativas, requiere la articulación de múltiples sistemas: planificación de trayectorias, asignación de tareas, prototipado virtual y control adaptativo, en una arquitectura integrada y coherente. La revisión de Karbouj et al. [12] de 124 publicaciones sobre comportamiento adaptativo robótico, identifica que, los parámetros de movimiento: trayectoria, velocidad y fuerza, son los más frecuentemente abordados, mientras que, la ausencia de marcos de IA explicable, y la escasa generalizabilidad de las arquitecturas de control adaptativo, constituyen las brechas más críticas. Este diagnóstico es consistente con los resultados de Dsouza et al. [28], que proponen una arquitectura de seguridad integral, basada en campo potencial artificial mejorado para espacios confinados, logrando una mejora del 83,87% en el rendimiento del sistema respecto a escenarios ideales.

El marco de prototipado virtual propuesto por Rega et al. [11] para el desarrollo de cobots móviles autónomos, demuestra que, la combinación de modelado CAD y simulación multicuerpo en MATLAB/Simulink con Simscape Multibody, permite verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad ISO/TS 15066 antes de la implementación física, reduciendo significativamente el tiempo y el riesgo asociados al proceso de diseño. La plataforma de realidad extendida presentada por Angelidis et al. [25] complementa esta metodología, al permitir comparar algoritmos de planificación de trayectorias, RRT clásico versus aprendizaje automático, en un entorno virtual antes de su implementación real, evidenciando que, los métodos de aprendizaje automático son más rápidos, pero con menor margen de seguridad que los algoritmos clásicos.

La asignación adaptativa de tareas entre el operario y el robot en función del estado fisiológico del primero, constituye uno de los avances más prometedores documentados en la literatura reciente. El marco híbrido CNN-DDQN presentado por Urrea [29], que clasifica nueve combinaciones de fatiga y habilidad del operario a partir de datos fisiológicos sintéticos, y optimiza la asignación de tareas en tiempo real a 10 Hz, alcanza 60,48 tareas por minuto, con una reducción del 7% en la fatiga del operario, y una tasa libre de colisiones del 99,9%. Estos resultados superan significativamente a métodos de referencia como PPO, A3C y SARSA, posicionando la combinación de percepción profunda y aprendizaje por refuerzo, como el paradigma de control más prometedor para la manufactura colaborativa de la Industria 5.0.

La revisión sistemática de Noorani et al. [13] sobre el control de impedancia variable, aporta el fundamento teórico para comprender cómo los cobots, pueden gestionar mecánicamente el contacto físico con el operario de forma segura y adaptativa, identificando

que, la integración de lógica difusa de orden fraccionario y aprendizaje por refuerzo, representa el estado del arte en este dominio. Esta evolución hacia modelos más sofisticados de interacción mecánica es coherente con el análisis de Sameh et al. [17] sobre los manipuladores inteligentes, que identifica a los actuadores de rigidez variable y los sistemas de fusión multimodal de sensores, como los avances de mayor madurez tecnológica en el horizonte inmediato [3].

### **Ciberseguridad, sostenibilidad y ética**

Las dimensiones transversales de ciberseguridad, sostenibilidad y ética representan áreas emergentes de investigación que están adquiriendo una relevancia creciente en el campo de la robótica colaborativa. Sarangi et al. [14] advierten que, la integración de cobots en redes industriales conectadas, los expone a vectores de ataque específicos: manipulación de comunicaciones, actualizaciones remotas comprometidas, explotación de módulos de IA; y que, dado que estos sistemas operan en proximidad con personas, cualquier compromiso de seguridad informática puede traducirse en daños físicos reales. Esta preocupación es especialmente relevante en el contexto de las fábricas inteligentes interconectadas, donde la superficie de ataque se amplía exponencialmente.

La perspectiva de la economía circular ha aportado un impulso significativo a la investigación sobre aplicaciones de cobots en desensamblaje y remanufactura. Jalali Alenjareghi et al. [20] presentan un marco basado en visión por computadora, para el desensamblaje asistido por robot de residuos electrónicos, logrando precisiones superiores al 96% en condiciones adversas. Choubbeh et al. [32] amplían esta perspectiva al contexto del desensamblaje de tarjetas de circuito impreso para recuperación de semiconductores, contribuyendo tanto a la economía circular como a la manufactura sostenible. Ranjan Das y Koskinopoulou [33] sintetizan este campo en una revisión, que enfatiza la necesidad de métricas estandarizadas y arquitecturas modulares, para alcanzar sistemas robóticos verdaderamente sostenibles e industrialmente viables.

La dimensión ética de la colaboración humano-robot ha encontrado en el marco "Trust by Design" de Merchán-Cruz et al. [16] una propuesta coherente y operacional que integra transparencia, privacidad, equidad, responsabilidad y seguridad en cada etapa del ciclo de vida del sistema, alineándose con la Ley de IA de la UE. Esta perspectiva es complementaria con los hallazgos de Kóczi y Sárosi [15] sobre robots humanoides, que identifican que, más del 50% de los estudios analizados, carecen de referencias a normas de seguridad específicas, evidenciando un rezago regulatorio que deberá ser abordado con urgencia. Banerjee [3], por su parte, recuerda que, la dimensión sociotécnica de la colaboración humano-robot, incluye dilemas éticos sobre el desplazamiento laboral, la necesidad de formación especializada en IA y las transformaciones en la dinámica del trabajo, que los marcos regulatorios actuales no abordan de forma suficiente.

La revisión de Urrea y Kern [2] sobre los avances y desafíos de la robótica industrial, sintetiza de forma comprensiva el estado del campo, identificando que, los cobots reducen tiempos de ensamblaje hasta un 30% y mejoran la calidad un 15%, mientras que, persisten desafíos críticos de costo, interoperabilidad y ética, que condicionan la democratización de estas tecnologías. O'Bryan et al. [40] ilustran estas tensiones en el contexto específico de la industria avícola, donde la integración de cobots, promete reducir tanto las lesiones musculoesqueléticas de los trabajadores, como las tasas de contaminación microbiológica, pero enfrenta brechas en adaptabilidad de grippers para superficies húmedas, y en marcos regulatorios sectoriales incompletos. Guerra et al. [39], finalmente, aportan un marco taxonómico de las tareas colaborativas en HRC, para identificar que las tareas estructuradas: guiado, recoger y colocar, entrega, tercera mano y co-acción; que predominan en la literatura, mientras que, la mayoría de los escenarios requieren coordinación de baja a moderada intensidad, lo que sugiere que, las implementaciones más accesibles y maduras son precisamente aquellas que menos complejidad de coordinación demandan.

## Conclusiones

La revisión de la literatura científica reciente sobre robots colaborativos en entornos de manufactura flexible permite formular las siguientes conclusiones:

**Primera.** Los sistemas de seguridad para cobots han alcanzado un nivel de madurez técnica notable, en cuanto a detección de presencia y modelado de colisiones, con algoritmos como YOLO V5 que logran precisiones del 99,9% con latencias de 0,0089 segundos por fotograma, y modelos de Árbol de Decisión para evaluación de impacto con  $R^2$  de 0,92. Sin embargo, persisten brechas significativas en la sobredependencia de modelos cuasiestáticos, la escasa diversidad demográfica de los datos de referencia y el rezago regulatorio frente al ritmo de avance tecnológico, especialmente en el ámbito de los robots humanoides y los sistemas de IA embebidos, donde más del 50% de los estudios revisados carecen de referencias a normas de seguridad específicas.

**Segunda.** Las interfaces humano-robot multimodales que integran realidad mixta, seguimiento ocular, captura de gestos y dispositivos vestibles, han demostrado su capacidad para reducir significativamente la carga cognitiva del operario: con puntuaciones NASA-TLX de apenas 27,68 sobre 100; y para democratizar el acceso a la programación robótica para trabajadores sin formación técnica especializada. La ergonomía cognitiva y la confianza del operario, emergen como factores determinantes para el éxito de la colaboración humano-robot, que son al menos tan importantes como las capacidades técnicas del sistema.

**Tercera.** La optimización de celdas de trabajo colaborativas, requiere metodologías integradas que articulen el prototipado virtual, la planificación dinámica de trayectorias, la asignación adaptativa de tareas y el control de impedancia variable en un marco unificado. Los enfoques híbridos que combinan redes neuronales convolucionales con aprendizaje por

refuerzo profundo, muestran resultados especialmente prometedores, alcanzando 60,48 tareas por minuto con una tasa libre de colisiones del 99,9% y una reducción del 7% en la fatiga del operario, superando consistentemente a los métodos de referencia.

**Cuarta.** La ciberseguridad, la sostenibilidad y la ética tecnológica, constituyen dimensiones transversales insoslayables, para el desarrollo responsable de la manufactura colaborativa. La integración de cobots en redes industriales conectadas amplía la superficie de ataque cibernético con consecuencias potencialmente físicas; las aplicaciones en economía circular y remanufactura, ofrecen beneficios ambientales concretos; y los marcos éticos como "Trust by Design" demuestran que, la incorporación de principios de transparencia, equidad y responsabilidad desde el diseño, reduce el rechazo tecnológico y fortalece la confianza sostenida de los operarios en los sistemas colaborativos.

**Quinta.** El horizonte tecnológico inmediato de la manufactura colaborativa, apunta hacia la convergencia de modelos fundacionales de visión-lenguaje, IA explicable, gemelos digitales adaptativos, sensores vestibles de biofeedback y modelos de negocio Cobot-as-a-Service (CaaS), todos los cuales prometen transformar el acceso, la usabilidad y el impacto de los cobots, especialmente en el segmento de las pequeñas y medianas empresas. La armonización normativa internacional y el desarrollo de estándares unificados entre ISO, IEC e IEEE constituyen una condición necesaria para que estos avances tecnológicos se traduzcan en implementaciones industriales seguras, eficientes y socialmente aceptadas.

### ***Referencias Bibliográficas***

- [1] M. Fernandez-Vega, D. Alfaro-Viquez, M. Zamora-Hernandez, J. Garcia-Rodriguez, y J. Azorin-Lopez, «Transforming Robots into Cobots: A Sustainable Approach to Industrial Automation», *Electronics*, vol. 14, n.º 11, p. 2275, jun. 2025, doi: 10.3390/electronics14112275.
- [2] C. Urrea y J. Kern, «Recent Advances and Challenges in Industrial Robotics: A Systematic Review of Technological Trends and Emerging Applications», *Processes*, vol. 13, n.º 3, p. 832, mar. 2025, doi: 10.3390/pr13030832.
- [3] N. Banerjee, «Human–Robot Collaboration for Smart Manufacturing in Industry 4.0: A Review, Analysis, and Prospects», en *Distributed Deep Learning and Explainable AI (XAI) in Industry 4.0*, vol. 55, L. Krishnasamy, R. K. Dhanaraj, D. Pamucar, y M. Ouaisa, Eds., en *Information Systems Engineering and Management*, vol. 55, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 151-183. doi: 10.1007/978-3-031-94637-0\_6.
- [4] S. M. B. P. B. Samarathunga, M. Valori, G. Legnani, y I. Fassi, «Assessing Safety in Physical Human–Robot Interaction in Industrial Settings: A Systematic Review of Contact Modelling and Impact Measuring Methods», *Robotics*, vol. 14, n.º 3, p. 27, feb. 2025, doi: 10.3390/robotics14030027.
- [5] A. Caneschi, M. Bottin, y G. Rosati, «Modeling Human–Robot Impact Dynamics in Collaborative Applications», *Actuators*, vol. 15, n.º 3, p. 165, mar. 2026, doi: 10.3390/act15030165.

- [6] M. J. Alenjareghi, S. Keivanpour, Y. A. Chinniah, y S. Jocelyn, «Computer vision-enabled real-time job hazard analysis for safe human–robot collaboration in disassembly tasks», *J Intell Manuf*, vol. 36, n.º 8, pp. 5563-5591, dic. 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02519-8.
- [7] R. Calderón-Sesmero, A. Lozano-Hernández, F. Frontela-Encinas, G. Cabezas-López, y M. De-Diego-Moro, «Human–Robot Interaction and Tracking System Based on Mixed Reality Disassembly Tasks», *Robotics*, vol. 14, n.º 8, p. 106, jul. 2025, doi: 10.3390/robotics14080106.
- [8] O. Sokolov, V. Andrusyshyn, A. Iakovets, y V. Ivanov, «Intelligent Human–Robot Interaction Assistant for Collaborative Robots», *Electronics*, vol. 14, n.º 6, p. 1160, mar. 2025, doi: 10.3390/electronics14061160.
- [9] E. Billing, F. Fraboni, L. Gualtieri, P. H. Rosen, y P. Thorvald, *Human Factors and Cognitive Ergonomics in Advanced Industrial Human-Robot Interaction*. Frontiers in Robotics and AI. doi: 10.3389/978-2-8325-6123-2.
- [10] G. Lettera, D. Costa, y M. Callegari, «A Hybrid Architecture for Safe Human–Robot Industrial Tasks», *Applied Sciences*, vol. 15, n.º 3, p. 1158, ene. 2025, doi: 10.3390/app15031158.
- [11] A. Rega, A. Pasquariello, F. Vitolo, y S. Patalano, «Integrated Framework for Virtual Prototyping of an Autonomous Mobile Cobot Using Computer-Aided Design and Multibody modelling», *Int J Interact Des Manuf*, vol. 19, n.º 12, pp. 8747-8759, dic. 2025, doi: 10.1007/s12008-025-02320-8.
- [12] B. Karbouj, R. Garha, K. Keßler, y J. Krüger, «Adaptive Robotic Behavior in Industrial Human–Robot Collaboration: A Systematic Review of Taxonomies, Enabling Mechanisms, and Research Frontiers», *IEEE access*, vol. 14, n.º s.n., pp. 1398-1422, dic. 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3649702.
- [13] M.-R. S. Noorani, E. H. Abud, S. Sahmani, y B. Safaie, «Variable impedance models including fuzzy fractional order for control of human–robot interaction: a systematic review», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 139, n.º 9-10, pp. 4269-4314, ago. 2025, doi: 10.1007/s00170-025-16101-w.
- [14] S. Sarangi, A. K. Cherukuri, S. Chandramouliswaran, A. Jonnalgadda, y F. Kamalov, «Security Issues and Trends of Industrial Robots and Cobots», en *Intelligent Robots and Cobots*, 1.<sup>a</sup> ed., V. Ramasamy, S. Balamurugan, y S. Peng, Eds., Wiley, 2025, pp. 355-376. doi: 10.1002/9781394198252.ch17.
- [15] D. Kóczy y J. Sárosi, «Safety Engineering for Humanoid Robots in Everyday Life—Scoping Review», *Electronics*, vol. 14, n.º 23, p. 4734, dic. 2025, doi: 10.3390/electronics14234734.
- [16] E. A. Merchán-Cruz *et al.*, «Trust by Design: An Ethical Framework for Collaborative Intelligence Systems in Industry 5.0», *Electronics*, vol. 14, n.º 10, p. 1952, may 2025, doi: 10.3390/electronics14101952.
- [17] A. Sameh, M. Fanni, y M. Rashad, «Advances in intelligent industrial manipulators for smart manufacturing and standardized automation technologies», *Discov. Robot.*, vol. 1, n.º 1, p. 12, nov. 2025, doi: 10.1007/s44430-025-00012-2.
- [18] A. Kumar Tyagi, *Industrial Robotics in Smart Manufacturing*, 1.<sup>a</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, 2025. doi: 10.1201/9781003614470.
- [19] O. Adamides, K. Subramanian, S. Arora, y F. Sahin, «Perception and Computation for Speed and Separation Monitoring Architectures», *Robotics*, vol. 14, n.º 4, p. 41, mar. 2025, doi: 10.3390/robotics14040041.

- [20] M. Jalali Alenjareghi, S. Keivanpour, y Y. Chinniah, «Computer Vision for Safe Human-Robot Collaboration in Disassembly: A Systematic Review and Conceptual Framework», en *2025 International Conference on Computational Intelligence and Robotics (CIR)*, Guangzhou, China: IEEE, sep. 2025, pp. 41-48. doi: 10.1109/CIR65373.2025.11257160.
- [21] E. Ayyildiz, T. K. Karaca, M. Cari, B. Yalcin Kavus, y N. Aydin, «Smart Risk Assessment and Adaptive Control Strategy Selection for Human–Robot Collaboration in Industry 5.0: An Intelligent Multi-Criteria Decision-Making Approach», *Processes*, vol. 13, n.º 10, p. 3206, oct. 2025, doi: 10.3390/pr13103206.
- [22] E. Bozkus y İ. Kaya, «A Fuzzy Risk Assessment Approach Based on Z-Numbers for Enhancing Safety and Human-Robot Collaboration in Automotive Sector», *Advanced Intelligent Systems*, vol. 7, n.º 11, p. 2500064, nov. 2025, doi: 10.1002/aisy.202500064.
- [23] R. Quesada Díaz, Á. Ballesteros Martín, F. Luque Lineros, y E. Billing, «Eye-Guided Human-Robot Collaborative Assembly: A Feasibility Study», en *Advances in Production Management Systems. Cyber-Physical-Human Production Systems: Human-AI Collaboration and Beyond*, vol. 764, H. Mizuyama, E. Morinaga, T. Nonaka, T. Kaihara, G. Von Cieminski, y D. Romero, Eds., en IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 764. , Cham: Springer Nature Switzerland, 2026, pp. 120-133. doi: 10.1007/978-3-032-03515-8\_9.
- [24] C.-C. Cazacu, M. Hanga, F. Chiscop, D.-A. Cazacu, y C. E. Cotet, «Controlling Industrial Robotic Arms Using Gyroscopic and Gesture Inputs from a Smartwatch», *Applied Sciences*, vol. 15, n.º 15, p. 8297, jul. 2025, doi: 10.3390/app15158297.
- [25] A. Angelidis, E. Plevritakis, G.-C. Vosniakos, y E. Matsas, «An open extended reality platform supporting dynamic robot paths for studying human–robot collaboration in manufacturing», *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 138, n.º 1, pp. 3-15, may 2025, doi: 10.1007/s00170-024-14504-9.
- [26] A.-R. Ioniță, D.-C. Anghel, y T. Boudouh, «Mind, Machine, and Meaning: Cognitive Ergonomics and Adaptive Interfaces in the Age of Industry 5.0», *Applied Sciences*, vol. 15, n.º 14, p. 7703, jul. 2025, doi: 10.3390/app15147703.
- [27] P. H. Rosen, S. Wischniewski, y K. Bengler, «Designing tasks in human-robot interaction: a laboratory study on dimensions of job control in semi-automated assembly», *Z. Arb. Wiss.*, vol. 79, n.º 3, pp. 312-328, sep. 2025, doi: 10.1007/s41449-025-00476-3.
- [28] D. A. Dsouza, S. Shenoy, M. Wang, y A. R. Chowdhury, «A comprehensive safety architecture for human–robot collaboration in confined workspaces using improved artificial potential field», *Robotica*, vol. 43, n.º 4, pp. 1373-1393, abr. 2025, doi: 10.1017/S0263574725000323.
- [29] C. Urrea, «Hybrid Deep Learning-Reinforcement Learning for Adaptive Human-Robot Task Allocation in Industry 5.0», *Systems*, vol. 13, n.º 8, p. 631, jul. 2025, doi: 10.3390/systems13080631.
- [30] M. Peñacoba-Yagüe y J. E. Sierra-García, «Generalized Design Methodology for Dual-Arm Robotic Platforms: From Conceptualization to Experimental Validation Within the MANiBOT Framework», *Machines*, vol. 14, n.º 1, p. 74, ene. 2026, doi: 10.3390/machines14010074.
- [31] S. Autsoy, O. Dunajeva, A. Pentel, O. Shvets, y M. Roosileht, «Application of Fuzzy Logic for Collaborative Robot Control», *Electronics*, vol. 14, n.º 20, p. 4029, oct. 2025, doi: 10.3390/electronics14204029.
- [32] N. R. Choubbeh, M. Zarei, W. Quadrini, S. Gusmeroli, y L. Fumagalli, «Safety-driven Electronic Components disassembly through Human-Robot Collaboration framework», *Procedia Computer Science*, vol. 253, pp. 1103-1112, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.01.172.

- [33] A. Ranjan Das y M. Koskinopoulou, «Toward Sustainable Manufacturing: A Review on Innovations in Robotic Assembly and Disassembly», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 100149-100166, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3576441.
- [34] Z. Saleem, F. Gustafsson, E. Furey, M. McAfee, y S. Huq, «A review of external sensors for human detection in a human robot collaborative environment», *J Intell Manuf*, vol. 36, n.º 4, pp. 2255-2279, abr. 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02341-2.
- [35] S. Ameur, K. Karboub, M. Tabaa, M. Hamlich, y R. Bearee, «Assistive Cobot for E-Waste Disassembly: Multi-Sensor HRC with Tool Recommendation», en *2025 32nd IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*, Marrakech, Morocco: IEEE, nov. 2025, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICECS66544.2025.11270718.
- [36] G. Xue, G. Chen, L. Sun, y H. Liu, «A State-Matching-Based Method for Identifying Intrusive Object Data and Evaluating Collision Features Using Robotic E-Skin Proximity Perception», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, pp. 1-12, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3551000.
- [37] Y. Cohen, A. Biton, y S. Shoval, «Fusion of Computer Vision and AI in Collaborative Robotics: A Review and Future Prospects», *Applied Sciences*, vol. 15, n.º 14, p. 7905, jul. 2025, doi: 10.3390/app15147905.
- [38] H. Gao, C. Chevallereau, y S. Caro, «Enhancing Safety in Collaborative Cable-Driven Parallel Robots: Contact Distinction and Management for Carrying Tasks», *IEEE Trans. Automat. Sci. Eng.*, vol. 22, pp. 18860-18874, 2025, doi: 10.1109/TASE.2025.3589966.
- [39] E. Guerra, S. T. Büttner, y M. Prilla, «Understanding Task Diversity in Human-Robot Collaboration: A Scoping Review», *International Journal of Human-Computer Interaction*, pp. 1-21, ene. 2026, doi: 10.1080/10447318.2025.2606215.
- [40] C. A. O'Bryan, K. Muraleetharan, N. S. Hettiarachchy, y P. G. Crandall, «Integrating Worker and Food Safety in Poultry Processing Through Human-Robot Collaboration: A Comprehensive Review», *Foods*, vol. 15, n.º 2, p. 294, ene. 2026, doi: 10.3390/foods15020294.