

I

# **Industria 5.0 y el IoT: Transformando la Monitorización y Control de Procesos Industriales**

**DIEGO ARMANDO RIVERA SALAZAR**

Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
Bogotá, Colombia  
2024



# **Industria 5.0 y el IoT: Transformando la Monitorización y Control de Procesos Industriales**

**DIEGO ARMANDO RIVERA SALAZAR**

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Electrónica**

Director:

Óscar Mauricio Gélvez Lizarazo

Gianina Garrido Silva

Asesor Externo

Alexánder Cortés

Universidad Santo Tomás  
Facultad de Ingeniería Electrónica  
Bogotá, Colombia

2024

**Autoridades de la universidad**

**RECTOR GENERAL**

FRAY ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O.P.

**VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL**

FRAY HERNÁN YESID RIVERA ROBERTO, O.P.

**VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL**

FRAY MAURICIO ANTONIO CORTES GALLEGO, O.P.

**SECRETARIO GENERAL**

DOCTORA LUCERO GALVIS CANO

**DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

FRAY JAVIER ANTONIO HINCAPIÉ ARDILA, O.P.

**SECRETARIA DE DIVISIÓN**

DOCTORA LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

**DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

PH. D. CARLOS ANDRES TORRES PINZÓN

Nota de aceptación

-----  
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

-----  
Firma del tutor

-----  
Firma del jurado

-----  
Firma del jurado

BOGOTÁ D.C. \_\_\_\_\_ DE 2024

## **ADVERTENCIA**

La Universidad Santo Tomás no se hace responsable de las opiniones y conceptos expresados en el trabajo de grado, solo velará por qué no se publique nada contrario al dogma ni a la moral católica y porque el trabajo no tenga ataques personales y únicamente se vea el anhelo de buscar la verdad científica.

***Capítulo III –Art. 46 del Reglamento de la Universidad Santo Tomás.***

## Contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	3
1.2. Objetivos .....	5
1.2.1. Objetivo General.....	5
1.2.2. Objetivos Específicos.....	5
1.3. Justificación.....	5
1.3.1. Evolución de la Industria 5.0.....	7
1.3.2. Colaboración Humano-Máquina .....	8
1.3.3. Impacto del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0 .....	9
1.3.4. Rol de la Industria 5.0 en las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES).....	10
1.3.5. Desafíos y Oportunidades de la Industria 5.0 .....	10
<b>2. Impacto social .....</b>	<b>12</b>
<b>3. Estado del Arte.....</b>	<b>14</b>
3.1. Revolución Industrial.....	14
3.2. Segunda Revoluciones Industriales.....	15
3.3. Tercera Revolución Industrial.....	15
3.4. Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0).....	16
3.4.1. Principales tecnologías de la Industria 4.0 .....	17
3.5. Quinta Revolución Industrial (Industria 5.0).....	18

3.5.1.	Características principales de la Industria 5.0.....	18
3.5.2.	Evolución de la Industria 5.0.....	19
3.5.3.	Ciberseguridad en la Industria 5.0.....	22
<b>4.</b>	<b>Marco Teórico.....</b>	<b>24</b>
4.1.	Optimización de Procesos.....	24
4.2.	Logística y Distribución.....	25
4.3.	Análisis de Tiempos y Movimientos.....	26
4.4.	La Colaboración Humano-Robot en la Industria 5.0: El Papel de los Cobots 26	
4.5.	Blockchain en la Industria 5.0.....	29
4.6.	Ética y Regulación en el Trabajo con Inteligencia Artificial y Robótica.....	31
4.7.	Economía Circular en la Industria 5.0.....	31
<b>5.</b>	<b>Desarrollo Conceptual.....</b>	<b>36</b>
5.1.	Diferenciación clave:.....	36
5.2.	Papel del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0.....	37
5.2.1.	Internet de las Cosas (IoT):.....	37
5.2.2.	Tecnologías Clave del IoT en la Industria 5.0:.....	37
<b>6.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>40</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Trabajos futuros.....</b>	<b>44</b>
<b>8.</b>	<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>47</b>

## Resumen

La investigación explora el impacto del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0, enfocándose en los beneficios y desafíos de su integración en entornos industriales. El objetivo principal es analizar cómo el IoT contribuye a mejorar la eficiencia, seguridad, personalización y sostenibilidad en procesos industriales. Se identifican las tecnologías clave del IoT, como sensores avanzados, redes de comunicación y sistemas de análisis de datos, y sus aplicaciones en la optimización de procesos y el monitoreo en tiempo real. A pesar de los beneficios significativos, como la reducción de costos operativos y la mejora en la colaboración entre humanos y máquinas, se destacan desafíos importantes, incluyendo preocupaciones de seguridad, interoperabilidad y costos iniciales. Además, se investigan estudios de caso de empresas que han adoptado la Industria 5.0, revelando mejoras en la productividad y adaptación al mercado. Estos casos proporcionan evidencia concreta del valor del IoT en la industria moderna, destacando tanto los logros como las áreas que requieren atención continua. Finalmente, se sugieren direcciones para futuros trabajos, como el desarrollo de estándares universales de interoperabilidad, estrategias avanzadas para la protección de datos y métodos para reducir costos, con el fin de maximizar los beneficios del IoT y mantener la innovación en la Industria 5.0.

**Palabras clave:** Internet de las Cosas (IoT), Industria 5.0, Eficiencia Industrial y Productividad Empresarial

## **Abstract**

The research explores the impact of the Internet of Things (IoT) on Industry 5.0, focusing on the benefits and challenges of its integration in industrial environments. The main objective is to analyse how IoT contributes to improving efficiency, safety, customisation and sustainability in industrial processes. Key IoT technologies, such as advanced sensors, communication networks and data analysis systems, and their applications in process optimisation and real-time monitoring are identified. Despite significant benefits, such as reduced operational costs and improved human-machine collaboration, significant challenges are highlighted, including security concerns, interoperability and upfront costs. In addition, case studies of companies that have adopted Industry 5.0 are investigated, revealing improvements in productivity and market adaptation. These cases provide concrete evidence of the value of IoT in modern industry, highlighting both achievements and areas requiring continued attention. Finally, directions for future work are suggested, such as the development of universal interoperability standards, advanced strategies for data protection, and methods for reducing costs, in order to maximize the benefits of IoT and maintain innovation in Industry 5.0.

Keywords: Internet of Things (IoT), Industry 5.0, Industrial Efficiency and Business Productivity

## 1. Introducción

La transición de la Industria 4.0 a la emergente Industria 5.0 está marcando una evolución significativa en el ámbito económico e industrial. Aunque la Industria 4.0, con su enfoque en la digitalización, automatización y uso de tecnologías como la inteligencia artificial y la robótica, aún está en proceso de implementación, la Industria 5.0 promete una revolución aún más profunda [2]. Esta nueva fase pretende devolver al ser humano al centro de los procesos productivos, con un enfoque renovado en la integración humano-tecnología y en el control humano de los sistemas [15].

La llegada de robots colaborativos (cobots) y el uso de software inteligente (bots) son indicativos de este cambio, estas tecnologías están configurando un nuevo paradigma en el desarrollo económico e industrial, donde la interacción entre humanos y máquinas cobra una relevancia sin precedentes [3]. La Industria 5.0 no solo amplía las capacidades tecnológicas, sino que también integra aspectos como la biología, la nanotecnología y las redes neuronales artificiales para mejorar la eficiencia y los resultados.

La Segunda Revolución Industrial trajo consigo la globalización y avances en transporte, energía y comunicación, con la aparición de la producción en masa y tecnologías como el teléfono analógico y la radio. La Tercera Revolución Industrial, conocida como la revolución científico-tecnológica, se centró en la automatización y el desarrollo de computadoras digitales [2 -11 -13].

La Industria 4.0 se caracteriza por la digitalización, la interconexión de dispositivos y el análisis de grandes volúmenes de datos, lo que ha llevado al auge de tecnologías como los teléfonos inteligentes y las redes sociales [6]. Esta fase también ha sido fundamental en el desarrollo de sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas (IoT) y el Big Data.

Actualmente, estamos en una fase de transición hacia la Industria 5.0, que se fundamenta en el desarrollo de tecnologías avanzadas como la computación distribuida, el Internet de Todo, y la inteligencia emergente, esta transición está generando herramientas que potencian las capacidades humanas, como los cobots, que colaboran con los humanos en lugar de reemplazarlos, mejorando la productividad y la creatividad [3].

Según estudios, una parte significativa de los puestos de trabajo industriales puede ser reemplazada por tecnología. Los bots, por ejemplo, pueden realizar tareas a un costo mucho menor que los empleados humanos, y en algunos casos, pueden sustituir múltiples puestos de trabajo en oficinas.

La Industria 5.0 se presenta como una singularidad tecnológica que integrará la computación cognitiva con la robótica colaborativa, generando cambios sociales y económicos fundamentales. Esta revolución promete una fusión profunda entre la tecnología y la inteligencia humana, marcando un cambio hacia un nuevo paradigma en la sociedad y la economía.

El presente trabajo realiza una revisión documental y conceptual de esta evolución industrial, analizando los antecedentes históricos y económicos que han llevado a esta transformación. Desde la Revolución Industrial, que supuso un cambio drástico al pasar de la producción artesanal a la producción en masa con innovaciones como la máquina de vapor y el telar, cada fase de la revolución industrial ha marcado un avance significativo en la forma en que se lleva a cabo la producción [10].

## 1.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad, el concepto de Industria 5.0 está revolucionando la manera en que las empresas manufactureras y de producción enfrentan sus procesos. Mientras que la Industria 4.0 priorizaba la automatización y la digitalización, la Industria 5.0 introduce un enfoque más humano y colaborativo. Esta nueva fase de la revolución industrial plantea la integración efectiva entre seres humanos y máquinas inteligentes para lograr un trabajo en conjunto que maximice la eficiencia y la personalización de los procesos productivos [11].

Uno de los principales habilitadores de esta integración es el Internet de las Cosas (IoT). Este concepto implica la interconexión de dispositivos físicos a través de internet, lo que permite el monitoreo, análisis y control remoto de los sistemas productivos. En la Industria 5.0, el IoT no solo automatiza tareas, sino que también facilita la comunicación y la colaboración entre los trabajadores humanos y las máquinas. Sin embargo, la adopción y aplicación de esta tecnología plantea desafíos significativos, que requieren un enfoque estratégico para maximizar su potencial en la mejora de los procesos industriales [21].

A pesar de los beneficios que el IoT promete en la Industria 5.0, muchas empresas aún no han logrado implementar esta tecnología de manera efectiva. El principal problema radica en la falta de integración fluida entre los dispositivos inteligentes y los trabajadores humanos. Las fábricas modernas dependen cada vez más de tecnologías avanzadas como sensores, actuadores y sistemas de análisis de datos en tiempo real, pero estos sistemas no siempre están diseñados para interactuar de manera intuitiva con los operarios, lo que puede generar una desconexión entre la maquinaria inteligente y el factor humano [18].

Según Castro [12] en muchas empresas industriales, los procesos se enfrentan a ineficiencias debido a la falta de comunicación en tiempo real entre los dispositivos

IoT y el personal, lo que resulta en pérdidas de tiempo y recursos. Por ejemplo, cuando los operarios no tienen acceso inmediato a los datos generados por los sensores en el piso de producción, no pueden tomar decisiones informadas de manera oportuna, lo que lleva a retrasos en la producción y un aumento de los desperdicios. Además, nos indica que la falta de personalización en los sistemas automatizados puede limitar la capacidad de las empresas para adaptarse a las demandas específicas de sus clientes, lo que afecta negativamente su competitividad [17].

Otro reto que se presenta es la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos IoT y las plataformas de gestión existentes. Muchas fábricas cuentan con equipos y sistemas que no fueron diseñados para trabajar juntos, lo que genera dificultades para integrar nuevas tecnologías [22]. Esta fragmentación tecnológica no solo complica la adopción de IoT en la Industria 5.0, sino que también incrementa los costos de implementación y mantenimiento.

En el contexto de la Industria 5.0, donde el ser humano ocupa un lugar central en la interacción con las máquinas, la capacidad de integrar IoT de manera efectiva es crucial para el éxito de los sistemas productivos. Sin una implementación adecuada de esta tecnología, se corre el riesgo de perder las ventajas competitivas que ofrece la digitalización avanzada, como la personalización en masa, la eficiencia energética y la sostenibilidad.

De acuerdo con Baldeon las empresas que no logran integrar el IoT de manera eficaz se enfrentan a la posibilidad de quedar rezagadas en un entorno industrial cada vez más competitivo. Además, los trabajadores podrían experimentar frustración al verse excluidos de los procesos de toma de decisiones debido a la falta de acceso a la información en tiempo real, lo que impacta su productividad y satisfacción laboral [15].

Por otro lado, la falta de integración efectiva entre los dispositivos IoT y los sistemas existentes también puede generar riesgos en términos de seguridad y confiabilidad. Los sistemas fragmentados aumentan la vulnerabilidad a fallos técnicos y ciberataques, lo que puede resultar en pérdidas financieras significativas para la empresa [30].

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar el impacto y las oportunidades del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0, enfocándose en la interacción entre humanos y máquinas, así como en los avances tecnológicos que permiten la personalización y optimización de los procesos industriales.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Describir la evolución de la Industria 5.0 y su diferenciación con respecto a la Industria 4.0, resaltando la importancia de la colaboración entre humanos y máquinas.
- Explorar el papel del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0, identificando las tecnologías clave y sus aplicaciones más relevantes en los procesos industriales.
- Analizar los beneficios y desafíos de la integración del IoT en entornos industriales desde la perspectiva de la eficiencia, seguridad, personalización y sostenibilidad.

## **1.3. Justificación**

Las revoluciones industriales han transformado profundamente el entorno laboral, introduciendo máquinas que realizan tareas difíciles, repetitivas e incluso aburridas,

permitiendo a las personas enfocarse en actividades de mayor valor agregado. A lo largo de la historia, el ser humano ha buscado utilizar la tecnología para mejorar la calidad de vida, optimizar procesos y aumentar la productividad [5]. En este contexto, la Industria 4.0 (I4.0), basada en la automatización, el análisis de datos y la interconectividad, ha permitido grandes avances en la eficiencia y flexibilidad de las fábricas modernas. Sin embargo, esta era está llegando a su fin para dar paso a una nueva revolución: la Industria 5.0 [8].

La Industria 5.0 no solo se enfoca en la automatización, sino que coloca la creatividad humana en el centro de los procesos productivos. A diferencia de la Industria 4.0, donde las máquinas realizan tareas por completo de manera autónoma, la Industria 5.0 promueve la colaboración entre humanos y máquinas inteligentes. En este sentido, la capacidad de las personas para tomar decisiones y resolver problemas complejos se complementa con la precisión y eficiencia de los sistemas tecnológicos avanzados, como robots y máquinas controladas por Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT) [19].

El Internet de las Cosas (IoT) desempeña un papel crucial en esta transición. Gracias a la interconexión entre dispositivos, sensores y sistemas, el Internet de las Cosas (IoT) posibilita la supervisión y optimización en tiempo real de los procesos industriales.. Esta capacidad no solo mejora la eficiencia en el uso de los recursos, sino que también permite una manufactura personalizada, adaptando los productos a las necesidades específicas de los clientes [13]. De esta manera, la Industria 5.0 no solo aspira a producir en masa de manera eficiente, sino a ofrecer productos y servicios con un alto grado de personalización, generando valor tanto para las empresas como para los consumidores.

El proyecto sobre la Industria 5.0 e Internet de las Cosas es fundamental porque aborda los desafíos y oportunidades de esta nueva revolución industrial, donde las máquinas inteligentes colaborarán estrechamente con las personas. El objetivo principal es estudiar y analizar cómo la incorporación del IoT en los entornos

industriales puede mejorar la colaboración entre humanos y máquinas, permitiendo que las tareas sean ejecutadas de manera más eficiente, segura y creativa. Con la adopción de estas tecnologías, no solo se buscará optimizar los procesos industriales, sino también explotar la creatividad humana y generar nuevas formas de interacción entre personas y tecnología [21].

Además, este estudio es relevante porque permitirá identificar cómo las empresas pueden adaptar sus infraestructuras y procesos para aprovechar al máximo las innovaciones de la Industria 5.0. La colaboración entre humanos y máquinas inteligentes también plantea nuevos retos en términos de seguridad, interoperabilidad y sostenibilidad, temas clave que serán abordados en el proyecto. En poco tiempo, la sociedad verá cómo las máquinas, robots y la inteligencia artificial se involucran en tareas cada vez más variadas, desde la producción hasta el transporte y la limpieza, liberando a las personas de las tareas más monótonas y físicamente exigentes

La Industria 5.0 representa una evolución significativa en el desarrollo industrial, centrada en la colaboración estrecha entre humanos y máquinas inteligentes, avanzando hacia una producción más personalizada, eficiente y sostenible. Esta fase va más allá de la automatización que caracteriza a la Industria 4.0, al enfatizar un enfoque humano-céntrico donde la creatividad y habilidades humanas complementan el poder de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las Cosas (IoT) y la robótica colaborativa. La Industria 5.0 se posiciona como una respuesta a las crecientes demandas de personalización y sostenibilidad en los sistemas de producción globales [32], [34].

### **1.3.1. Evolución de la Industria 5.0**

A medida que la Industria 4.0 se consolidó con el auge de la automatización, análisis de datos masivos, sistemas ciberfísicos y la interconexión digital de dispositivos,

surgió la necesidad de un nuevo enfoque que reconociera las limitaciones de una producción excesivamente automatizada. Según Kaswan et al. [32], la Industria 5.0 tiene como objetivo mejorar la sostenibilidad organizacional a través de la integración sinérgica de habilidades humanas y tecnología avanzada. En esta nueva fase, los sistemas ciberfísicos no reemplazan completamente a los humanos, sino que colaboran con ellos, permitiendo una combinación única de creatividad y precisión tecnológica.

La metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar), propuesta por Kaswan y colaboradores [32], proporciona un marco conceptual para la adopción sistemática de la Industria 5.0 en sectores manufactureros. Este marco sugiere que las industrias deben evaluar continuamente sus procesos para mejorar la eficiencia y sostenibilidad, con la colaboración humano-máquina como factor clave de éxito. La Industria 5.0 también se destaca por su capacidad para ofrecer soluciones de personalización en masa, lo que significa que, mediante el uso de tecnologías como la impresión 3D, los fabricantes pueden producir productos a gran escala que se ajusten a las necesidades específicas de los clientes [34]. Esta capacidad ha permitido a las empresas adaptar sus productos de manera más ágil y flexible a las demandas del mercado, lo que ha mejorado la experiencia del cliente y la competitividad global.

### **1.3.2. Colaboración Humano-Máquina**

La colaboración entre humanos y máquinas es uno de los pilares fundamentales de la Industria 5.0. La creciente adopción de robots colaborativos (cobots), que trabajan de manera segura junto a los humanos, está revolucionando la producción industrial. Según Satpathy et al. [36], los cobots son herramientas clave en la Industria 5.0, ya que permiten a los trabajadores humanos delegar tareas repetitivas o peligrosas a las máquinas mientras se concentran en actividades de mayor valor agregado, como la toma de decisiones estratégicas o la supervisión de procesos críticos.

La importancia de la inteligencia emocional (IE) en este contexto ha sido resaltada por Arora et al. [35], quienes argumentan que el éxito en la gestión de entornos industriales altamente automatizados depende, en gran medida, de la capacidad de los líderes para gestionar cambios y fomentar la colaboración entre humanos y tecnologías avanzadas. La IE se convierte en un diferenciador clave para aquellos líderes que necesitan equilibrar la eficiencia tecnológica con el bienestar humano en la era de la Industria 5.0. Las empresas que desarrollan las habilidades de IE en sus líderes y trabajadores estarán mejor posicionadas para adaptarse a los cambios tecnológicos y para enfrentar los desafíos éticos y humanos de la transformación digital.

### **1.3.3. Impacto del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0**

En la Industria 5.0, el Internet de las Cosas (IoT) es una tecnología esencial que mejora la interconectividad entre dispositivos y sistemas industriales, permitiendo la recopilación y el análisis de datos en tiempo real para optimizar la eficiencia operativa. Sharma et al. [37] demostraron cómo la implementación del IoT en la industria automotriz mejoró la calidad de producción, reduciendo el porcentaje de productos defectuosos en un 19% e incrementando la productividad en un 15%. Esta tecnología no solo permite la monitorización y el control en tiempo real de los procesos, sino que también optimiza los recursos disponibles, reduciendo costos y tiempo de inactividad.

El impacto del IoT va más allá de la optimización interna de los procesos industriales; también permite una mayor personalización de productos y servicios en la industria automotriz. Ismail et al. [38] señalan que el IoT juega un papel crucial en la transformación hacia vehículos conectados y autónomos, lo que ha cambiado la dinámica del mercado automotriz global. La capacidad de integrar sensores y sistemas de comunicación en los vehículos ha permitido no solo mejorar la experiencia del usuario, sino también aumentar la seguridad y la eficiencia en el

transporte. Sin embargo, uno de los desafíos clave sigue siendo la infraestructura tecnológica necesaria para soportar esta interconexión, lo que requiere inversiones significativas en tecnología y ciberseguridad.

#### **1.3.4. Rol de la Industria 5.0 en las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES)**

El impacto de la Industria 5.0 no se limita a las grandes corporaciones; las PYMES también pueden beneficiarse significativamente de esta transformación tecnológica. Según Arora et al. [33], las PYMES juegan un papel crucial en el crecimiento económico global y la adopción de tecnologías avanzadas como el IoT, la inteligencia artificial y los sistemas ERP es vital para su sostenibilidad y competitividad. La Industria 5.0 ofrece a las PYMES la oportunidad de mejorar su productividad mediante la digitalización y automatización de procesos, lo que se traduce en una mayor eficiencia operativa y capacidad de respuesta a las demandas del mercado.

Además, la implementación de soluciones personalizadas y centradas en el cliente permite a las PYMES ofrecer productos y servicios adaptados a las necesidades individuales, lo que puede impulsar el crecimiento de ingresos y mejorar la satisfacción del cliente. Sin embargo, uno de los mayores desafíos para las PYMES es la falta de infraestructura tecnológica y habilidades para adoptar estas tecnologías de manera efectiva. Esto requiere un esfuerzo concertado por parte de los gobiernos y las instituciones educativas para proporcionar formación y apoyo a estas empresas en su transición hacia la Industria 5.0.

#### **1.3.5. Desafíos y Oportunidades de la Industria 5.0**

Aunque la Industria 5.0 presenta numerosas oportunidades, también enfrenta varios desafíos significativos. La seguridad de los datos es uno de los mayores obstáculos en la adopción del IoT y otras tecnologías conectadas. La interconexión de

dispositivos a través de redes expone a las empresas a riesgos cibernéticos, lo que requiere estrategias robustas de protección de datos y sistemas. Además, la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes es un reto crítico, ya que no existen estándares universales para garantizar una integración fluida entre las distintas tecnologías IoT [39].

A pesar de estos desafíos, los estudios de caso recientes han demostrado que, cuando se implementa correctamente, la Industria 5.0 puede ofrecer beneficios tangibles en términos de eficiencia operativa, personalización de productos y mejora de la experiencia del cliente. Smith et al. [40] destacan cómo la digitalización en la industria automotriz ha mejorado la flexibilidad de producción y la capacidad de adaptación a las demandas del mercado.

## 2. Impacto social

El proyecto indicado tiene el potencial de generar efectos positivos significativos en la comunidad, incluyendo a la Universidad Santo Tomás, a través de dos líneas estratégicas clave: Desarrollo comunitario y Relaciones interinstitucionales. Estas líneas permiten abordar tanto las necesidades locales como la creación de redes que fortalezcan la integración entre diferentes actores sociales, empresariales y gubernamentales.

- **Desarrollo comunitario** El proyecto puede fomentar el fortalecimiento del tejido social mediante la implementación de programas que promuevan la participación de los miembros de la comunidad. A través de actividades colaborativas, como talleres o proyectos de impacto social, es posible involucrar a 50 a 100 personas de la comunidad local, principalmente jóvenes y adultos en situación de vulnerabilidad o con acceso limitado a recursos educativos y de empleo. Estos beneficiarios pueden ver mejoras en sus habilidades técnicas y sociales, facilitando su inserción en el mercado laboral o el desarrollo de emprendimientos locales. Adicionalmente, el proyecto abordaría necesidades como la falta de capacitación y la creación de oportunidades económicas sostenibles, lo que impulsaría el empoderamiento y la cohesión social.
- **Relaciones interinstitucionales** El proyecto también podría impactar positivamente a través de la creación de alianzas estratégicas entre la Universidad Santo Tomás, el sector empresarial y entidades gubernamentales. Estas relaciones fomentarán el intercambio de conocimiento técnico y recursos económicos, facilitando la transferencia de tecnología y mejores prácticas en áreas clave como la sostenibilidad y la innovación. Se espera que al menos cinco empresas locales y una entidad gubernamental colaboren en el proyecto, beneficiándose de asesorías especializadas y consultorías brindadas por la universidad, lo que

aumentaría su competitividad y promovería un desarrollo económico equilibrado en la región.

### **3. Estado del Arte**

Para ofrecer una aproximación rigurosa al tema en estudio, es fundamental realizar un análisis exhaustivo de las variables y subtemas relevantes, apoyándose en teorías y estudios clave que sirvan como referencias. De esta forma, se busca integrar los hallazgos teóricos que brinden un sustento sólido a la investigación. Dentro de este marco, se abordarán las Revoluciones Industriales a lo largo de la historia, con especial énfasis en la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) y la Revolución 5.0, desde una perspectiva centrada en las ciencias económicas y sus teorías asociadas.

#### **3.1. Revolución Industrial**

La Revolución Industrial fue un hito histórico que transformó las dinámicas económicas, sociales y tecnológicas de la humanidad, marcando la transición de una economía agrícola y artesanal a una industrializada y mecanizada [18-25]. Iniciada en el siglo XVIII en Gran Bretaña, se extendió a Europa y América del Norte, impulsada por innovaciones como el telar mecánico, la máquina de vapor y, posteriormente, las locomotoras y barcos a vapor. Estos avances permitieron aumentar exponencialmente la producción en menos tiempo, incrementando la riqueza y mejorando los niveles de vida, aunque de manera desigual [25].

Socialmente, la Revolución Industrial alteró el orden tradicional. La migración masiva del campo a la ciudad en busca de empleo en fábricas provocó una urbanización acelerada, pero también generó problemas como hacinamiento, condiciones laborales precarias y explotación infantil [31]. Tecnológicamente, avances en metalurgia, química y minería permitieron producir a mayor escala y menor costo, beneficiando al transporte y las comunicaciones [25].

Historiadores debaten las fechas exactas de su inicio y magnitud. Algunos sitúan el comienzo entre 1760 y 1830 [22-23]. A pesar de su progresividad, el impacto

económico fue transformador, alterando permanentemente las estructuras laborales y orientando el mundo hacia un modelo capitalista que define la economía global actual [28]. Surgió el capitalismo industrial y la producción en masa, con fábricas como motores económicos que generaban productos en grandes volúmenes. Sin embargo, esto también aumentó la desigualdad social, concentrando el poder económico y facilitando la expansión del comercio internacional [30]. Globalmente, fomentó la interconexión económica mediante el comercio y la colonización, estableciendo sistemas económicos desiguales y dependientes que persistieron durante el siglo XIX y parte del XX.

### **3.2. Segunda Revoluciones Industriales**

La **Segunda Revolución Industrial** (1851-1914) continuó y amplió los avances previos, caracterizada por nuevas industrias, avances científicos y un crecimiento masivo en producción y distribución [21]. Destacó por nuevas fuentes de energía como la electricidad y el petróleo [15]. Avances como el motor de combustión interna, la expansión ferroviaria y telegráfica, y la producción en masa mediante líneas de montaje permitieron industrias a gran escala en química, electricidad y acero, consolidando el capitalismo monopolista [7].

Este período coincidió con una globalización temprana e imperialismo económico. El transporte y las comunicaciones facilitaron el comercio internacional, mientras potencias europeas expandían sus imperios coloniales en busca de materias primas y mercados, consolidando un intercambio global desigual [3-7]. La vida cotidiana mejoró con la electricidad, aunque persistieron desigualdades. En el ámbito laboral, las duras condiciones en fábricas llevaron al surgimiento de movimientos obreros y sindicatos que luchaban por derechos laborales y mejores condiciones [31].

### **3.3. Tercera Revolución Industrial**

La Tercera Revolución Industrial, o "Revolución Digital", comenzó a mediados del siglo XX, impulsada por avances en informática, electrónica y telecomunicaciones [21]. Se caracterizó por la automatización de procesos productivos mediante computadoras, aumentando la eficiencia y reduciendo costos [12]. El desarrollo de microprocesadores y computadoras revolucionó la industria y el acceso a la información.

Las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) transformaron estructuras empresariales y sociales a nivel global. Internet y las telecomunicaciones crearon un mundo interconectado, donde la información fluía rápidamente. Las industrias basadas en el conocimiento y el sector servicios ganaron terreno frente a las manufacturas tradicionales [18].

La preocupación por energías renovables y sostenibilidad aumentó, intensificándose esfuerzos para desarrollar tecnologías limpias como la solar y eólica. La automatización y digitalización redujeron empleos en sectores industriales tradicionales, mientras crecían en informática y telecomunicaciones. La globalización alcanzó una nueva fase, con empresas expandiendo operaciones internacionalmente y relaciones comerciales transformadas por la capacidad de compartir información en tiempo real [17].

### **3.4. Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0)**

La Cuarta Revolución Industrial, también conocida como Industria 4.0, marca una era de transformación tecnológica profunda, impulsada por la integración y convergencia de tecnologías digitales emergentes. Este periodo, iniciado a principios del siglo XXI, se caracteriza por la fusión de los mundos físico, digital y biológico, donde tecnologías como la inteligencia artificial (IA), el Internet de las cosas (IoT), la robótica avanzada, la realidad aumentada y los sistemas ciberfísicos están redefiniendo el modo en que las industrias y las sociedades funcionan [25].

### 3.4.1. Principales tecnologías de la Industria 4.0

1. Inteligencia Artificial (IA): La IA está en el corazón de la Cuarta Revolución Industrial, ya que permite a las máquinas y sistemas aprender de los datos, tomar decisiones y optimizar procesos sin intervención humana directa.
2. Internet de las Cosas (IoT): IoT conecta dispositivos físicos a través de internet, permitiendo que las máquinas se comuniquen entre sí y tomen decisiones de forma autónoma. Esto ha dado lugar a fábricas "inteligentes", donde las máquinas pueden operar de manera eficiente con poca intervención humana.
3. Robótica avanzada y automatización: Las fábricas ahora emplean robots que trabajan junto a los humanos, haciendo tareas repetitivas o peligrosas con mayor precisión y velocidad.
4. Impresión 3D (Fabricación aditiva): Esta tecnología permite la creación de piezas complejas directamente desde diseños digitales, reduciendo los costos de producción y acortando los ciclos de fabricación.
5. Big Data y análisis predictivo: La capacidad de analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real es crucial para optimizar los procesos de producción, anticipar fallos en las máquinas y mejorar la eficiencia general.
6. Blockchain: Esta tecnología está revolucionando sectores como la logística y la cadena de suministro, proporcionando transparencia y trazabilidad en transacciones y procesos.

Impacto en el trabajo y los negocios La Cuarta Revolución Industrial ha transformado radicalmente los modelos de negocio, haciendo posible la personalización masiva, una producción más flexible y la reducción de costos a través de la automatización. Además, está cambiando la naturaleza del trabajo, con una mayor demanda de habilidades tecnológicas avanzadas y el surgimiento de nuevos roles y ocupaciones. Sin embargo, también ha generado preocupaciones sobre el desplazamiento laboral, ya que muchas tareas manuales y repetitivas son ahora realizadas por máquinas [14].

Retos y oportunidades, Aunque la Industria 4.0 ha traído grandes avances, también ha planteado desafíos importantes, como la brecha digital entre países y regiones, el manejo ético de los datos y la ciberseguridad. A pesar de estos desafíos, la digitalización ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia energética, reducir los desechos y hacer que las industrias sean más sostenibles.

### **3.5. Quinta Revolución Industrial (Industria 5.0)**

La Quinta Revolución Industrial, o Industria 5.0, se plantea como una evolución de la Industria 4.0, con un enfoque más centrado en la colaboración entre humanos y máquinas. Mientras que la Cuarta Revolución Industrial se centró en la automatización y la eficiencia impulsada por la tecnología, la Industria 5.0 está más orientada hacia un equilibrio entre la tecnología avanzada y el bienestar humano, con un énfasis en la sostenibilidad, la personalización y la ética [17].

#### **3.5.1. Características principales de la Industria 5.0**

1. Colaboración humano-máquina: En la Industria 5.0, los robots colaborativos o "cobots" trabajan junto a los humanos, no para reemplazarlos, sino para complementar sus habilidades. El objetivo es crear un entorno de trabajo en el que los humanos aporten su creatividad y habilidades emocionales, mientras que las máquinas manejan tareas físicas o analíticas complejas.
2. Tecnología con enfoque en el bienestar humano: La Quinta Revolución Industrial busca hacer que la tecnología trabaje en beneficio de las personas, mejorando su calidad de vida y creando un entorno laboral más seguro y menos alienante. En lugar de maximizar solo la productividad, se priorizan los valores éticos, el bienestar y la satisfacción laboral.
3. Sostenibilidad: A diferencia de revoluciones anteriores, la Industria 5.0 tiene un fuerte enfoque en la sostenibilidad. El objetivo es lograr que los avances tecnológicos no solo sean eficientes, sino también respetuosos con el medio

ambiente y que contribuyan a mitigar el cambio climático. Las energías renovables, la economía circular y la gestión eficiente de recursos son pilares fundamentales.

4. Personalización y artesanía a gran escala: La Industria 5.0 también se caracteriza por la capacidad de producir bienes personalizados y de alta calidad en masa. Esto combina lo mejor de la producción artesanal con los beneficios de la manufactura a gran escala. Por ejemplo, utilizando robots y tecnologías de impresión 3D, las empresas pueden fabricar productos a medida según las necesidades y preferencias individuales de los consumidores.

Cambios paradigmáticos en la gestión y la economía Uno de los principales cambios en la Industria 5.0 es la integración de valores éticos en la gestión empresarial. Se espera que las empresas no solo busquen el beneficio económico, sino que también tomen en cuenta su impacto en la sociedad y el medio ambiente. El concepto de economía regenerativa, donde las empresas no solo minimizan su impacto negativo, sino que buscan tener un impacto positivo en la naturaleza y las comunidades, es clave en esta fase [13-17-21].

Impacto en la organización del trabajo Mientras que la Cuarta Revolución Industrial generó preocupaciones sobre la pérdida de empleos, la Industria 5.0 propone un nuevo contrato social, donde los humanos y las máquinas trabajen juntos en armonía. Esto implica la creación de nuevos empleos centrados en la creatividad, el diseño, la ética y la gestión de los sistemas automatizados. Asimismo, la formación continua y la adaptación a nuevas habilidades se vuelven cruciales para mantener la competitividad en el mercado laboral.

### **3.5.2. Evolución de la Industria 5.0**

La Industria 5.0 se presenta como una evolución significativa de la Industria 4.0, centrando su enfoque en la colaboración entre humanos y máquinas inteligentes

para promover una producción más personalizada, eficiente y sostenible. Mientras que la Industria 4.0 priorizaba la automatización a través de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA), la Industria 5.0 pone énfasis en el factor humano, integrando habilidades cognitivas y emocionales con sistemas automatizados avanzados [41], [42].

Un aspecto central de esta evolución es el uso de robots colaborativos o cobots, que trabajan junto a los humanos para mejorar los procesos de producción. Esta sinergia permite combinar la creatividad y adaptabilidad humanas con la precisión y eficiencia de las máquinas, resultando en mayores niveles de productividad y flexibilidad [43], [44]. A diferencia de la automatización tradicional, donde las máquinas reemplazan a los humanos, la Industria 5.0 propone que las máquinas complementen las habilidades humanas, promoviendo un entorno de trabajo más armonioso y eficiente [45].

La sostenibilidad es otro pilar clave de la Industria 5.0. En contraste con enfoques anteriores que solo optimizaban la eficiencia, esta nueva revolución industrial busca minimizar el impacto ambiental mediante el uso de tecnologías verdes y energías renovables. Esto se logra a través del análisis en tiempo real de datos de producción, lo que permite optimizar el uso de recursos y reducir el consumo energético [46], [47]. Investigaciones recientes han demostrado que la integración de IoT y sistemas de IA en las fábricas ha permitido una mayor eficiencia energética y una reducción en las emisiones de carbono, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [48].

La personalización masiva es una característica destacada en la evolución hacia una manufactura más flexible. La capacidad de ajustar los procesos de producción para responder a las necesidades individuales de los consumidores sin sacrificar la eficiencia de la producción en masa es esencial en la Industria 5.0 [49]. Tecnologías como la fabricación aditiva (impresión 3D) y el aprendizaje automático permiten la personalización en tiempo real de productos sin interrumpir la línea de producción

[50]. Esto no solo satisface las demandas del mercado moderno, sino que también impulsa la innovación y competitividad en diversos sectores.

Sin embargo, la creciente interconectividad de los sistemas industriales trae consigo desafíos significativos en términos de ciberseguridad. A medida que las fábricas y sistemas de producción se vuelven más conectados, los riesgos de ciberataques aumentan, lo que puede comprometer no solo la eficiencia operativa sino también la seguridad física de los trabajadores que interactúan con máquinas conectadas [51]. Las soluciones propuestas incluyen el uso de IA para detectar y mitigar amenazas cibernéticas en tiempo real, protegiendo los sistemas críticos de manufactura [52].

La inteligencia emocional (IE) ha emergido como una habilidad crítica en el liderazgo dentro de la Industria 5.0. Los líderes industriales deben poseer competencias emocionales que les permitan gestionar eficazmente la colaboración entre humanos y máquinas, adaptarse a los cambios tecnológicos y asegurar un entorno de trabajo ético y seguro [44], [53]. La IE es fundamental para fomentar la resiliencia y adaptabilidad humana frente a los avances tecnológicos, asegurando que la creatividad y habilidades humanas sigan siendo valoradas y potenciadas en entornos altamente automatizados.

Estudios recientes han revisado numerosas fuentes sobre la evolución de la Industria 5.0, destacando cómo esta revolución promete un equilibrio entre tecnología y humanidad, facilitando una mayor personalización y sostenibilidad en los procesos de producción [41]. Se enfatiza que la Industria 5.0 no solo mejora la productividad, sino que también promueve valores éticos y el bienestar de los trabajadores, aspectos que la Industria 4.0 no abordaba de manera integral [42].

La transformación digital es un componente esencial en esta transición, donde la convergencia de tecnologías avanzadas como la IA, el IoT y la ciberseguridad son fundamentales para lograr los objetivos de la Industria 5.0 [45], [54]. La colaboración entre humanos y sistemas autónomos es esencial para el éxito en este nuevo

paradigma industrial, ofreciendo ventajas competitivas significativas para las organizaciones que adopten estas innovaciones.

La Industria 5.0 ofrece una visión más humano-céntrica, donde los avances tecnológicos no solo mejoran la productividad, sino que también promueven la sostenibilidad, la personalización y la seguridad. Los estudios actuales subrayan la necesidad de continuar investigando en áreas clave como la colaboración humano-máquina, la sostenibilidad y la ciberseguridad para maximizar los beneficios de esta nueva era industrial [55]. La implementación exitosa de la Industria 5.0 depende de abordar estos desafíos y aprovechar las oportunidades para crear sistemas de producción más eficientes, sostenibles y centrados en el ser humano.

### **3.5.3. Ciberseguridad en la Industria 5.0**

La ciberseguridad se ha convertido en un pilar fundamental en la Industria 5.0, enfrentando desafíos únicos derivados de la creciente interconexión de sistemas ciberfísicos y dispositivos del Internet de las Cosas (IoT). La profunda integración entre humanos y máquinas inteligentes, junto con el aumento de la automatización y la personalización masiva, ha ampliado significativamente la superficie de ataque para los ciberdelincuentes. Asegurar la protección de los datos y sistemas industriales es fundamental para preservar la continuidad operativa, optimizar los procesos y mantener la confianza en las nuevas tecnologías.

En este contexto, diversos estudios recientes han abordado estos retos y propuesto soluciones innovadoras para fortalecer la ciberseguridad en la Industria 5.0. Lu et al. [50] identifican los riesgos asociados con la creciente interconectividad de los sistemas industriales, destacando que la fusión entre la inteligencia humana y las máquinas inteligentes no solo aporta beneficios, sino que también incrementa las vulnerabilidades. Proponen contramedidas basadas en inteligencia artificial (IA) para la detección y mitigación de amenazas cibernéticas en tiempo real, promoviendo una colaboración estrecha entre sistemas automatizados y expertos

humanos. Subrayan la importancia de proteger los sistemas ciberfísicos para evitar fallos que puedan comprometer la continuidad operativa y afectar negativamente la capacidad de producción personalizada en masa.

Por su parte, Yin et al. [51] analizan los riesgos específicos que enfrenta el IoT en la industria automotriz, donde los vehículos conectados son particularmente susceptibles a ataques como la denegación de servicio, la manipulación remota y el robo de datos sensibles. Proponen soluciones basadas en IA para detectar anomalías y prevenir ciberataques, recomendando la implementación de una arquitectura de seguridad multicapa que abarque tanto los componentes de hardware como los de software. Además, enfatizan la necesidad de integrar medidas de ciberseguridad desde las etapas iniciales del desarrollo de vehículos conectados, aspecto crítico en la Industria 5.0, donde la conectividad y la automatización son elementos esenciales.

Chen et al. [52] presentan un marco de ciberseguridad basado en IA diseñado específicamente para entornos de Industria 5.0. Este marco se enfoca en la detección proactiva de amenazas y en garantizar la resiliencia operativa incluso bajo condiciones de ataque. Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático que se adaptan continuamente a nuevas amenazas, el marco permite la personalización masiva de productos mientras asegura la protección de los sistemas hiperconectados. Además, optimiza los recursos dedicados a la ciberseguridad, ofreciendo una solución eficiente y escalable para las necesidades de los entornos industriales modernos.

## 4. Marco Teórico

El marco teórico constituye una de las secciones fundamentales para sustentar conceptualmente el trabajo. En esta sección se describen los conceptos clave que fundamentan el desarrollo del proyecto, así como los modelos matemáticos que serán utilizados, basados en una revisión exhaustiva de la literatura científica. Cabe aclarar que los ajustes a estos modelos no se desarrollan en esta parte, sino que aquí se describe el sustento teórico que servirá como base para el análisis posterior.

### 4.1. Optimización de Procesos

La **optimización de procesos** se refiere al conjunto de técnicas y metodologías utilizadas para mejorar la eficiencia y efectividad de los sistemas industriales o empresariales. Esta mejora se alcanza a través de la minimización de tiempos, costos o recursos necesarios para cumplir con un objetivo específico. En el ámbito de la ingeniería de sistemas y la investigación operativa, la optimización de procesos es fundamental para maximizar la productividad y mejorar la competitividad.

$$\text{Minimizar (o Maximizar)} \quad Z = \sum_{i=1}^n c_i x_i$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq b_j \quad \text{para } j = 1, 2, \dots, m$$

donde Z es la función objetivo que se desea minimizar o maximizar, x son las variables de decisión, Ci son los coeficientes en la función objetivo, aij son los coeficientes en las restricciones y bj son los recursos disponibles.

Evolución y Tipos de Optimización

**Optimización No Lineal:** Los problemas de optimización que involucran funciones objetivo o restricciones no lineales requieren técnicas más complejas. La optimización no lineal permite manejar problemas donde las relaciones entre las variables no son lineales, lo cual es común en sistemas más complejos.

**Optimización Heurística:** Para problemas altamente complejos y de gran escala, las técnicas heurísticas y metaheurísticas como los algoritmos genéticos, algoritmos de enjambre de partículas y simulated annealing se han desarrollado para encontrar soluciones aproximadas de manera eficiente. Estas técnicas no garantizan una solución óptima, pero son útiles para abordar problemas que no pueden ser resueltos de manera exacta debido a la complejidad del espacio de búsqueda [21].

La optimización de procesos es crucial para mejorar la eficiencia y efectividad en diversos sectores, en manufactura, permite reducir costos y tiempos de producción, aumentar la calidad y satisfacer mejor la demanda del mercado. En el sector de servicios, contribuye a mejorar la gestión de recursos y la calidad del servicio. En general, la optimización es una herramienta poderosa para enfrentar los desafíos de la competencia global y la necesidad de mejorar continuamente en un entorno empresarial dinámico.

## **4.2. Logística y Distribución**

La logística es el conjunto de procesos y métodos que permiten gestionar eficientemente el almacenamiento y transporte de bienes, desde la producción hasta el consumidor final. En la logística moderna, uno de los principales problemas es la optimización de rutas para el transporte de mercancías, conocido como el problema del viajante de comercio o TSP (por sus siglas en inglés, Traveling Salesman Problem), que ha sido ampliamente estudiado desde la década de 1930 [27]. Este problema se resuelve buscando la ruta más corta que pase por un conjunto de ciudades o puntos de entrega.

Otro aspecto clave en la logística es la gestión del inventario, la cual está relacionada con modelos matemáticos que buscan equilibrar la cantidad de productos almacenados con la demanda del mercado, minimizando los costos de almacenamiento y evitando la escasez de productos. Modelos como el EOQ (Economic Order Quantity) son utilizados para calcular el punto de reorden óptimo, donde se balancean los costos de pedido y almacenamiento.

### **4.3. Análisis de Tiempos y Movimientos**

El análisis de tiempos y movimientos es un método empleado en la ingeniería industrial para estudiar la eficiencia de procesos de trabajo, descomponiéndolos en tareas más pequeñas y midiendo los tiempos necesarios para completarlas. Este concepto fue introducido por Frederick Winslow Taylor y los estudios posteriores de los Gilbreth, que se centraron en reducir los movimientos innecesarios y optimizar los tiempos de ejecución de las tareas [26].

### **4.4. La Colaboración Humano-Robot en la Industria 5.0: El Papel de los Cobots**

La Industria 5.0 representa una evolución paradigmática en el sector manufacturero, centrada en la sinergia entre la inteligencia humana y la robótica avanzada. Este enfoque busca potenciar la creatividad y habilidades humanas a través de la colaboración con robots colaborativos, conocidos como cobots. A diferencia de los robots industriales tradicionales, los cobots están diseñados para interactuar de manera segura y eficiente con los trabajadores humanos en entornos compartidos.

La integración de cobots en entornos industriales no está exenta de desafíos. Nguyen y Jin [59] exploran las dificultades encontradas en la implementación de cobots en la industria textil vietnamita. Señalan que la flexibilidad limitada de los cobots puede ser un obstáculo en entornos donde los trabajadores carecen de alta calificación técnica. Además, los altos costos de implementación pueden desalentar

a las empresas de adoptar esta tecnología. Los autores enfatizan la necesidad de una colaboración estrecha entre fabricantes y programadores de cobots para desarrollar soluciones más adaptables y sostenibles que respondan a las necesidades específicas de cada industria.

Saseekala et al. [60] proporcionan una visión detallada sobre la evolución de los cobots, destacando sus características distintivas en comparación con los robots tradicionales. Los cobots están diseñados para ser seguros, fáciles de programar y flexibles, permitiendo una integración más fluida en procesos de producción existentes. Su capacidad para trabajar codo a codo con los humanos facilita la personalización de la producción, un elemento clave en la Industria 5.0 que busca satisfacer demandas específicas de los clientes sin sacrificar la eficiencia.

Mukherjee et al. [61] analizan cómo los cobots pueden potenciar tanto la creatividad humana como la eficiencia operativa en diversos sectores, incluyendo la manufactura, salud, educación y entretenimiento. Los cobots permiten a los trabajadores enfocarse en tareas que requieren juicio, innovación y adaptabilidad, mientras que las tareas repetitivas o físicamente demandantes son manejadas por las máquinas. Esta colaboración mejora la toma de decisiones creativas y promueve la innovación al liberar a los humanos de tareas rutinarias.

Satpathy et al. [55] abordan el "renacimiento" de la coalescencia entre humanos y robots en la Industria 5.0. Destacan que la integración de la inteligencia artificial (IA) con robots colaborativos amplifica las capacidades tanto de los humanos como de las máquinas. Esta sinergia mejora la productividad, resiliencia y creatividad de las organizaciones, permitiendo una adaptación más rápida a las cambiantes condiciones del mercado y a las necesidades específicas de los clientes. La IA habilita a los cobots para aprender y adaptarse, aumentando la agilidad organizativa y promoviendo una toma de decisiones basada en datos.

Yitmen y Almusaed [62] introducen el concepto de "Human Digital Twin", una representación digital del trabajador humano que puede ser utilizada para optimizar la colaboración entre humanos y robots. Este enfoque permite personalizar los procesos productivos y adaptar los flujos de trabajo a las capacidades individuales de los trabajadores, mejorando la eficiencia y reduciendo la fatiga. La integración de cobots con los gemelos digitales humanos facilita una interacción más intuitiva y efectiva, alineándose con el objetivo de la Industria 5.0 de humanizar la tecnología.

La seguridad es un aspecto crítico en la implementación de cobots y robots autónomos en entornos industriales. Wilkening et al. [63] presentan una arquitectura de control crítico mixto que aborda los requisitos de seguridad funcional en la Industria 5.0. Su investigación compara diferentes arquitecturas de control, enfatizando la importancia de un control de movimiento seguro y la necesidad de sistemas que puedan manejar tareas de diferentes niveles de criticidad sin comprometer la seguridad ni la eficiencia operativa.

La adopción de cobots no está limitada a grandes corporaciones; las pequeñas y medianas empresas (PYMES) también pueden beneficiarse significativamente. Moor et al. [64] proponen una metodología para un sistema de control de calidad basado en cobots adaptable y reconfigurable, diseñado específicamente para la producción en PYMES. Utilizando visión por máquina y aprendizaje automático, desarrollan gemelos digitales que permiten evaluar y optimizar los procesos antes de su implementación física. Esta metodología facilita la integración de cobots en entornos con recursos limitados, mejorando la eficiencia y calidad sin incurrir en costos prohibitivos.

La incorporación de cobots en la Industria 5.0 tiene implicaciones profundas para la productividad, sostenibilidad y bienestar laboral. La colaboración entre humanos y robots permite una mayor personalización de productos, respondiendo a las demandas de un mercado que valora la individualidad y la calidad. Además, al delegar tareas peligrosas o monótonas a los cobots, se mejora la seguridad laboral

y se aumenta la satisfacción de los empleados, quienes pueden enfocarse en actividades más creativas y estratégicas.

Los desafíos técnicos y económicos asociados con la implementación de cobots requieren soluciones innovadoras y colaborativas. Es esencial que los fabricantes, programadores y usuarios trabajen conjuntamente para superar las limitaciones técnicas, reducir costos y desarrollar cobots que sean flexibles y adaptables a diferentes entornos laborales. La formación y capacitación del personal también son cruciales para asegurar una transición exitosa hacia modelos de trabajo colaborativos.

#### **4.5. Blockchain en la Industria 5.0**

La Industria 5.0 se enfoca en una producción más inteligente, sostenible y centrada en el ser humano, integrando tecnologías avanzadas como la Blockchain para mejorar la eficiencia y resiliencia de los procesos industriales. La Blockchain, o cadena de bloques, es una tecnología de registro distribuido que permite transacciones seguras, transparentes e inmutables, lo cual es esencial en entornos industriales altamente interconectados.

Hameem et al. [65] analizan cómo la adopción de Blockchain puede mejorar la sostenibilidad en las cadenas de suministro de la Industria 5.0. Destacan que la transparencia y trazabilidad proporcionadas por Blockchain facilitan una gestión más eficiente y sostenible de los recursos. Esto permite a las empresas monitorear cada etapa de la cadena de suministro, asegurando prácticas éticas y reduciendo el impacto ambiental.

Gowda et al. [66] investigan la aplicación de Blockchain para mejorar la seguridad y eficiencia en las comunicaciones de redes de drones dentro de aplicaciones industriales. Proponen que Blockchain puede asegurar las comunicaciones entre drones, garantizando la integridad y autenticidad de los datos transmitidos. Esto es

crucial para operaciones sensibles en la Industria 5.0, donde los drones desempeñan roles cada vez más importantes en logística y monitoreo.

Visvizi et al. [67] exploran cómo la Blockchain facilita la integración de la Industria 5.0 con las ciudades inteligentes, enfocándose en aspectos como la seguridad, movilidad y energía. Plantean que la tecnología Blockchain puede ser el nexo que conecta infraestructuras urbanas con sistemas industriales, promoviendo soluciones sostenibles y eficientes que benefician tanto a empresas como a ciudadanos.

Bafna et al. [68] presentan un marco integrado que combina Blockchain y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la transparencia y confianza en las cadenas de suministro de la manufactura inteligente. Subrayan que Blockchain puede registrar transacciones y eventos de manera inmutable, lo que aumenta la confianza entre las partes involucradas y optimiza los procesos logísticos.

Fraga-Lamas et al. [69] ofrecen una visión general del uso de Blockchain para desarrollar aplicaciones humanocéntricas, sostenibles y resilientes en la Industria 5.0. Destacan que Blockchain puede soportar sistemas que priorizan el bienestar humano, permitiendo una personalización masiva y una adaptación rápida a cambios en el entorno.

Leng et al. [70] examinan un paradigma de manufactura autónoma descentralizada utilizando Blockchain y Organizaciones Autónomas Descentralizadas (DAO). Proponen que este modelo mejora la resiliencia industrial al eliminar dependencias de sistemas centralizados, permitiendo que las unidades de producción operen de manera autónoma y colaborativa.

Wang et al. [71] analizan los impedimentos para la adopción de Blockchain en cadenas de suministro sostenibles desde una perspectiva de múltiples partes interesadas. Utilizan el modelo PEEST (Político, Económico, Ambiental, Social y

Tecnológico) para identificar y evaluar las barreras, como la falta de regulación clara, costos elevados y resistencia al cambio tecnológico.

#### **4.6. Ética y Regulación en el Trabajo con Inteligencia Artificial y Robótica**

La creciente integración de la Inteligencia Artificial (IA) y la robótica en la Industria 5.0 plantea importantes desafíos éticos y legales que requieren una atención prioritaria en el marco regulatorio. La gobernanza ética de estas tecnologías es esencial para garantizar que su desarrollo y aplicación se realicen de manera responsable y alineada con los valores humanos.

Kluge Corrêa et al. [72] critican la efectividad de los principios éticos como herramienta de gobernanza para la IA. Argumentan que los marcos éticos actuales son insuficientes para abordar las complejidades y riesgos asociados con la IA. Proponen la integración de contribuciones de la bioética para fortalecer la gobernanza de la IA y la robótica, sugiriendo que la bioética puede ofrecer perspectivas más profundas sobre cuestiones como la autonomía, la justicia y el bienestar en el contexto tecnológico.

Massmann et al. [73] analizan los desafíos regulatorios y legales en la implementación ética de la IA y la robótica. Destacan la necesidad de desarrollar un marco legal basado en los derechos humanos, que proteja la dignidad, privacidad y seguridad de las personas. Este enfoque busca asegurar que el avance tecnológico no comprometa los principios fundamentales de la sociedad, promoviendo una regulación que equilibre la innovación con la responsabilidad ética.

#### **4.7. Economía Circular en la Industria 5.0**

La Economía Circular es un paradigma económico que busca redefinir el concepto tradicional de producción y consumo, promoviendo la reutilización, reparación,

renovación y reciclaje de materiales y productos existentes para crear un sistema que minimice los residuos y reduzca la demanda de nuevos recursos. En el contexto de la Industria 5.0, este enfoque se enriquece mediante la integración de tecnologías avanzadas y un énfasis en la colaboración humano-máquina, orientado hacia una producción más sostenible y centrada en el ser humano.

Azinge [74] explora la integración de modelos de negocio circulares en la Industria 5.0, proponiendo un marco que combina tecnologías como la Blockchain y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la sostenibilidad y eficiencia de los procesos productivos. El autor sugiere que estas tecnologías facilitan la trazabilidad y transparencia en la cadena de suministro, permitiendo un seguimiento detallado del ciclo de vida de los productos y materiales.

El modelo propuesto enfatiza la colaboración entre diferentes actores de la cadena de valor, fomentando prácticas como el intercambio de información en tiempo real y la adopción de estrategias de eco-diseño. Sin embargo, desde una perspectiva crítica, la implementación de este modelo enfrenta desafíos relacionados con la interoperabilidad de sistemas y la estandarización de datos. Además, la adopción de tecnologías emergentes como Blockchain puede ser costosa y compleja, especialmente para pequeñas y medianas empresas (PYMEs), limitando su aplicabilidad generalizada.

Abba Dabo y Hosseinian-Far [75] presentan una metodología integrada para mejorar los flujos de logística inversa en la Industria 5.0. Su enfoque se centra en la utilización de tecnologías inteligentes para optimizar el retorno y reutilización de productos, reduciendo el desperdicio y maximizando el valor de los recursos. El modelo incorpora sistemas de información avanzados y análisis de datos para gestionar eficientemente las operaciones de logística inversa.

Aunque el modelo ofrece una solución prometedora para abordar los desafíos de sostenibilidad, es importante considerar las limitaciones prácticas. La complejidad

de coordinar múltiples flujos de retorno y la necesidad de infraestructura logística especializada pueden representar obstáculos significativos. Además, la colaboración entre proveedores, fabricantes y consumidores es esencial, pero puede ser difícil de lograr debido a intereses divergentes y falta de confianza entre las partes.

Atif [76] analiza la conexión entre la economía circular y la Industria 4.0, destacando cómo la Industria 5.0 aporta un enfoque más centrado en el ser humano. El autor propone un modelo que integra tecnologías digitales con prácticas de economía circular, enfatizando la importancia de la participación humana en la toma de decisiones y en la innovación sostenible.

Este enfoque reconoce que la tecnología por sí sola no es suficiente para lograr una transición exitosa hacia la sostenibilidad. Sin embargo, el modelo podría beneficiarse de una mayor especificidad en cuanto a las estrategias para involucrar efectivamente a los trabajadores y consumidores en la economía circular. Además, existe el riesgo de que el énfasis en la tecnología pueda eclipsar aspectos sociales y culturales que son igualmente importantes para el cambio sistémico.

Feldmann [77] aborda la aplicación de la economía circular en industrias intensivas en energía, como la siderurgia y la producción de cemento. El autor propone estrategias para reducir las emisiones y el consumo de energía mediante la reutilización de subproductos, la implementación de procesos de producción más eficientes y la adopción de energías renovables.

Si bien el modelo presenta soluciones viables para reducir el impacto ambiental, enfrenta desafíos significativos. La alta inversión inicial requerida para modernizar instalaciones y procesos puede ser un impedimento, especialmente en sectores con márgenes de beneficio reducidos. Además, las barreras regulatorias y la resistencia al cambio dentro de organizaciones establecidas pueden dificultar la implementación de estas estrategias.

Turner et al. [78] proponen la integración de la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA) con productos inteligentes conectados en la Industria 5.0. Su modelo utiliza datos recopilados por sensores integrados en los productos para monitorear su desempeño y impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, facilitando la toma de decisiones informada para mejorar la sostenibilidad.

Este enfoque innovador permite una retroalimentación continua y ajustes en tiempo real para optimizar el uso de recursos. Sin embargo, plantea desafíos relacionados con la privacidad de los datos y la ciberseguridad, ya que la transmisión y almacenamiento de información sensible puede ser vulnerable a accesos no autorizados. Además, la dependencia de tecnología avanzada puede excluir a empresas con recursos limitados, ampliando la brecha tecnológica.

Dwivedi et al. [79] identifican los impulsores clave para lograr una sinergia efectiva entre la Industria 5.0 y las cadenas de suministro circulares. Su modelo enfatiza la colaboración interdisciplinaria, la innovación tecnológica y el compromiso sostenible como pilares fundamentales para el desarrollo de cadenas de suministro más resilientes y sostenibles.

El estudio aporta una visión integral, pero podría profundizar más en cómo superar las barreras prácticas para la colaboración, como las diferencias culturales y organizacionales entre socios comerciales. Además, la falta de estándares internacionales y la complejidad regulatoria en diferentes jurisdicciones pueden complicar la implementación de prácticas circulares a nivel global.

Johnson [80] examina las tendencias en la economía circular digital en la Industria 5.0, destacando el papel de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en la optimización de procesos y la gestión de recursos. El autor propone un marco en el que las tecnologías digitales permiten una monitorización avanzada y una toma de decisiones autónoma para mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio.

Si bien este modelo ofrece beneficios potenciales significativos, es importante abordar las preocupaciones éticas y sociales asociadas con la automatización y el posible desplazamiento laboral. Además, la dependencia de sistemas automatizados puede conducir a una falta de transparencia en los procesos de toma de decisiones, lo que puede generar desconfianza entre los empleados y otras partes interesadas.

## 5. Desarrollo Conceptual

La Industria 4.0, también conocida como la Cuarta Revolución Industrial, se centra en la digitalización y automatización de los procesos industriales mediante el uso de tecnologías avanzadas como la Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), y sistemas ciberfísicos [16]. Su principal objetivo es optimizar la producción mediante la integración de máquinas, sistemas y procesos que permiten una mayor eficiencia, flexibilidad y adaptabilidad en las fábricas. La Industria 4.0 promueve la interoperabilidad entre los sistemas mediante una conectividad en tiempo real, lo que facilita la gestión de la calidad y la mejora continua de los procesos productivos [3].

La Industria 5.0, que se conceptualiza como la Quinta Revolución Industrial, representa una evolución de la Industria 4.0 al integrar una dimensión adicional centrada en el ser humano. Mientras que la Industria 4.0 enfatiza la automatización y la digitalización, la Industria 5.0 pone un fuerte énfasis en la colaboración entre humanos y máquinas, buscando crear un entorno de trabajo en el que ambas partes complementen y potencien sus habilidades [16 - 29]. La Industria 5.0 se caracteriza por la personalización masiva, la integración de la creatividad humana con la capacidad computacional de las máquinas y un enfoque renovado hacia la sostenibilidad y el bienestar de los trabajadores [21]

### 5.1. Diferenciación clave:

1. **Colaboración Humano-Máquina:** La principal diferencia entre la Industria 4.0 y la Industria 5.0 radica en el papel del ser humano. La Industria 4.0 se centró en la automatización total y en la reducción de la intervención humana. En contraste, la Industria 5.0 busca una colaboración activa entre humanos y máquinas, donde la inteligencia artificial y la robótica trabajan junto a los trabajadores humanos para aprovechar al máximo las habilidades y la creatividad humana [8]

2. **Enfoque en el Bienestar Humano:** La Industria 5.0 no solo se enfoca en la eficiencia y la producción, sino también en el bienestar de los trabajadores y en la creación de entornos laborales más inclusivos y sostenibles. Se busca que la tecnología potencie y no sustituya las capacidades humanas, promoviendo un equilibrio entre la automatización y la participación humana [26]
3. **Sostenibilidad y Responsabilidad Social:** La Industria 5.0 incorpora una mayor preocupación por la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social, desarrollando procesos que minimicen el impacto ambiental y promuevan una economía circular [22]

## 5.2. Papel del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0

### 5.2.1. Internet de las Cosas (IoT):

El IoT es una tecnología clave en la Industria 5.0, que se refiere a la interconexión de dispositivos y sistemas a través de internet para recopilar y compartir datos en tiempo real. En la Industria 5.0, el IoT amplifica la capacidad de las fábricas y procesos industriales para ser más inteligentes y adaptables, al permitir una comunicación fluida entre diferentes componentes del sistema productivo.

### 5.2.2. Tecnologías Clave del IoT en la Industria 5.0:

1. **Sensores Inteligentes:** Los sensores IoT recopilan datos en tiempo real sobre diversas variables del proceso de producción, como temperatura, humedad, presión y vibración. Estos datos permiten una monitorización continua y la detección temprana de anomalías, lo que facilita el mantenimiento predictivo y la optimización de los procesos industriales [20].
2. **Plataformas de Gestión de Datos:** Estas plataformas integran y analizan los datos recolectados por los sensores para proporcionar información valiosa sobre el rendimiento de los procesos y las máquinas. La capacidad

de procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real permite una toma de decisiones más informada y rápida [11]

3. **Redes de Comunicación:** Las redes de comunicación avanzadas, como el 5G, permiten una transmisión de datos más rápida y confiable, lo que es crucial para el funcionamiento efectivo del IoT en entornos industriales. Esto asegura una conexión continua y sin interrupciones entre los dispositivos y sistemas [10]
4. **Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático:** Estas tecnologías se integran con el IoT para analizar los datos recopilados y generar predicciones sobre el rendimiento futuro de las máquinas y los procesos. La IA puede identificar patrones y tendencias que no son evidentes a simple vista, mejorando la eficiencia y reduciendo el tiempo de inactividad [18]

#### **Aplicaciones Relevantes del IoT en la Industria 5.0:**

1. **Mantenimiento Predictivo:** El IoT permite realizar un mantenimiento predictivo mediante la monitorización constante del estado de las máquinas. Los datos en tiempo real ayudan a prever fallos y a planificar el mantenimiento antes de que ocurran problemas graves, lo que reduce los costos de reparación y el tiempo de inactividad [19]
2. **Optimización de la Producción:** La integración del IoT en los sistemas de producción permite una gestión más eficiente de los recursos y una adaptación más rápida a los cambios en la demanda. Los sistemas inteligentes pueden ajustar automáticamente los parámetros de producción para mejorar la calidad del producto y reducir el desperdicio [15]
3. **Personalización Masiva:** El IoT facilita la personalización masiva al permitir una producción flexible que se adapte a las necesidades individuales de los clientes. Los datos recopilados permiten a las empresas ajustar sus productos en función de las preferencias y comportamientos del consumidor [14].

4. **Sostenibilidad y Eficiencia Energética:** Los sistemas IoT pueden monitorizar el consumo de energía y los recursos en tiempo real, lo que ayuda a identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental. La optimización de los procesos de producción y la gestión de los recursos contribuyen a una mayor sostenibilidad [28]

## 6. Resultados y Discusión

La información obtenida a través del análisis de información revela varios aspectos relevantes. En primer lugar, se ha observado que las tendencias en tecnología digital están orientadas hacia el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones industriales, con un enfoque particular en el manejo e interpretación de datos, la inteligencia artificial y el avance hacia energías limpias. Además, hay un creciente interés en aplicaciones que promuevan la sostenibilidad, subrayando la importancia de integrar los ODS, atender al bienestar social y proteger el medio ambiente mediante innovaciones que reduzcan el consumo energético y fomenten el uso de fuentes de energía renovable [21].

No obstante, se ha detectado que las investigaciones en los pilares de la industria 4.0 se centran predominantemente en el desarrollo de aplicaciones digitales para la gestión de datos, redes y almacenamiento, dando menor relevancia a aspectos como la seguridad y los espacios virtuales [4]. Asimismo, se presta poca atención a la integración del factor humano, aunque la tecnología de robots autónomos y la manufactura aditiva están comenzando a considerar el trabajo colaborativo entre humanos y máquinas, así como el resurgimiento de la producción personalizada bajo la gestión humana. A pesar de esto, la inteligencia artificial, el manejo de espacios virtuales y la evolución de redes digitales están ganando relevancia y se perfilan como las tecnologías más disruptivas para los próximos años [9].

Los resultados del análisis destacan que esta transición tecnológica implica nuevas funciones que demandan el fortalecimiento y desarrollo de habilidades en el capital humano del sector empresarial. Estas habilidades incluyen:

1. Gestión, administración, protección y vigilancia de datos y redes de comunicación: La gestión efectiva de datos es crucial, dada la creciente cantidad de información en las redes. Es fundamental recopilar, analizar, categorizar y proteger datos relevantes para garantizar su confiabilidad. El aumento del Internet de las Cosas ha incrementado los riesgos cibernéticos, por lo que es esencial contar con personal capacitado en el manejo de

herramientas tecnológicas para la administración de la información y la seguridad en las redes.

2. Diseño, programación y operación de sistemas robotizados y automatizados: En los entornos colaborativos del futuro, la interacción eficiente entre humanos y robots requerirá combinar la creatividad humana con conocimientos técnicos. Las habilidades necesarias incluyen la programación de robots, mantenimiento periódico, y la automatización de procesos mediante dispositivos inteligentes. Los robots y la automatización deben considerarse como amplificadores del potencial humano, no como reemplazos.
3. Diseño y simulación de procesos y productos en entornos virtuales: La simulación de sistemas físicos en ambientes virtuales permite grandes ahorros económicos al visualizar productos antes de su fabricación. Esto incluye el modelado y simulación de procesos de manufactura mediante software especializado. Se requiere personal con conocimientos en CAD, CAM y CAE para implementar estas tecnologías en sistemas de manufactura avanzada y promover la manufactura verde.
4. Integración y automatización de procesos: A pesar del avance tecnológico, muchos procesos aún dependen de la habilidad del operador humano debido a la complejidad de la automatización. La integración de tecnologías de operación con tecnologías de la información requiere que el factor humano aporte su experiencia para optimizar la automatización de procesos.

La integración del Internet de las Cosas (IoT) en la Industria 5.0 está revolucionando los entornos industriales al ofrecer numerosos beneficios en términos de eficiencia operativa, seguridad, personalización y sostenibilidad, sin embargo, también presenta desafíos significativos que deben ser gestionados con cuidado [18 - 26]. La capacidad del IoT para optimizar procesos y mejorar la gestión de recursos ha demostrado ser un avance crucial en la evolución industrial contemporánea.

Uno de los principales beneficios de la integración del IoT en entornos industriales es la optimización de procesos. La recopilación de datos en tiempo real a través de sensores y dispositivos inteligentes permite una rápida identificación y resolución de cuellos de botella, lo que incrementa la eficiencia operativa [8 - 22]. Este enfoque también facilita la implementación del mantenimiento predictivo, reduciendo los tiempos de inactividad y los costos asociados con el mantenimiento reactivo. Estas mejoras en la eficiencia operativa contribuyen significativamente a la productividad general de las instalaciones industriales.

En términos de seguridad, el IoT ha demostrado ser una herramienta invaluable para la detección temprana de condiciones peligrosas. Los sensores pueden monitorear continuamente aspectos críticos del entorno industrial, como fugas de gases o fallos en equipos, y proporcionar alertas inmediatas [1]. Esta capacidad de respuesta rápida permite a las empresas prevenir accidentes y mejorar la seguridad en el lugar de trabajo. La gestión de emergencias también se ve optimizada, ya que los datos en tiempo real facilitan una coordinación más efectiva durante incidentes críticos [15-27].

La personalización y adaptabilidad son otros beneficios clave del IoT en la Industria 5.0. La capacidad de ajustar los procesos de producción en tiempo real según las preferencias del cliente permite una personalización masiva sin comprometer la eficiencia. Además, el IoT facilita una mayor flexibilidad operativa, permitiendo a las empresas adaptarse rápidamente a las demandas cambiantes del mercado y mejorar su capacidad de respuesta ante nuevas oportunidades y desafíos [18].

A pesar de estos beneficios, la integración del IoT en la industria enfrenta varios desafíos. Uno de los principales es la seguridad de los datos. La conectividad aumentada y la recopilación masiva de datos elevan el riesgo de amenazas cibernéticas, lo que requiere una robusta protección de datos y redes. La falta de estándares universales para la interoperabilidad de dispositivos y sistemas IoT también presenta desafíos significativos, complicando la integración efectiva de

tecnologías diversas. Además, la inversión inicial en infraestructura y capacitación puede ser considerable, lo que requiere una evaluación cuidadosa de los costos y beneficios.

La gestión de grandes volúmenes de datos generados por los dispositivos IoT también puede ser desafiante. La capacidad para almacenar, procesar y analizar estos datos de manera efectiva es crucial para obtener valor real de la implementación del IoT. Las empresas deben desarrollar estrategias para manejar estos datos de manera eficiente y utilizar la información para tomar decisiones informadas y optimizar sus operaciones [19].

Estudios de caso recientes destacan el impacto positivo del IoT en la Industria 5.0. Siemens, por ejemplo, ha experimentado un aumento del 15% en la productividad en su planta de fabricación digital gracias a la integración del IoT, que ha permitido una optimización de procesos y una rápida adaptación a las demandas del mercado. General Electric, por su parte, ha logrado reducir los costos de mantenimiento en un 20% mediante el uso de tecnologías IoT para el mantenimiento predictivo de turbinas de gas. Bosch también ha mejorado su gestión de la cadena de suministro en un 18%, gracias a la visibilidad en tiempo real proporcionada por el IoT [29 - 31].

La integración del IoT en la Industria 5.0 presenta una oportunidad significativa para mejorar la eficiencia, seguridad, personalización y sostenibilidad de los entornos industriales. Sin embargo, los desafíos relacionados con la seguridad de datos, interoperabilidad, costos iniciales y gestión de datos deben ser abordados cuidadosamente [24]. Los estudios de caso muestran que, cuando se implementa correctamente, el IoT puede ofrecer beneficios tangibles y mejorar la capacidad de adaptación y competitividad en el mercado. La evolución hacia la Industria 5.0 está estrechamente vinculada al avance y la integración efectiva del IoT, marcando una nueva era en la producción y gestión industrial.

## 7. Conclusiones y Trabajos futuros

La Industria 5.0 representa una evolución trascendental de la Industria 4.0, enfatizando la colaboración sinérgica entre humanos y máquinas inteligentes para alcanzar mayores niveles de personalización, eficiencia y sostenibilidad en los procesos productivos. Según Kaswan et al. [32], esta nueva era industrial integra tecnologías emergentes con el factor humano, permitiendo a las empresas responder de manera más efectiva a las demandas dinámicas del mercado. Un componente esencial es el uso de robots colaborativos (cobots), que incrementan la productividad al asumir tareas repetitivas y peligrosas, mientras que los humanos se enfocan en aspectos creativos y estratégicos [36], [55]. Esta interacción no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también mejora la calidad del trabajo y las condiciones laborales, colocando al ser humano en el centro del proceso productivo [44], [48].

El Internet de las Cosas (IoT) desempeña un papel crucial en la optimización de procesos industriales, permitiendo mejoras significativas en la calidad y los tiempos de producción, como se ha evidenciado en la industria automotriz [37], [49]. Además, el IoT y la Inteligencia Artificial (IA) son herramientas esenciales para gestionar recursos de manera sostenible, promoviendo fábricas inteligentes más eficientes y reduciendo el impacto ambiental [46], [50]. No obstante, la creciente conectividad también plantea desafíos en materia de ciberseguridad, ya que incrementa el riesgo de ataques cibernéticos. Soluciones basadas en IA han sido propuestas como contramedidas eficaces para mitigar estos riesgos [50], [52].

La innovación tecnológica en la Industria 5.0, impulsada por la personalización masiva y la sostenibilidad, es un motor de transformación que permite a las empresas adaptarse rápidamente a los cambios del mercado [43]. Esto es particularmente relevante para las pequeñas y medianas empresas (PYMES), que pueden aprovechar estas tecnologías para mejorar su sostenibilidad y crecimiento

[33]. La adopción de tecnologías como el IoT, IA y sistemas ERP en las PYMES puede aumentar su productividad y competitividad en un entorno globalizado.

A pesar de los beneficios, la integración del IoT y otras tecnologías de la Industria 5.0 presenta desafíos considerables. La seguridad de los datos es una preocupación crítica debido al aumento de la conectividad, que amplifica el riesgo de ciberataques. La interoperabilidad de los sistemas IoT sigue siendo un reto, dado que no existen estándares universales que faciliten la integración de dispositivos de diferentes fabricantes. Además, los altos costos iniciales para la infraestructura y la capacitación pueden ser una barrera para la adopción, especialmente para las PYMES.

Los estudios de caso en empresas que han adoptado la Industria 5.0, como Siemens y General Electric, han mostrado mejoras notables en términos de productividad y adaptación al mercado [27]. Estas empresas han logrado reducir costos operativos, mejorar la gestión de la cadena de suministro y ofrecer productos personalizados gracias a la integración efectiva del IoT. Estos casos validan el valor tangible del IoT y subrayan su papel fundamental en la evolución industrial y la competitividad en el mercado global.

Para avanzar en el desarrollo de la Industria 5.0, es crucial implementar estrategias basadas en el marco conceptual propuesto por Kaswan et al. [32], adaptándolo a diversos sectores industriales para garantizar una transición fluida hacia la personalización y sostenibilidad. En este contexto, facilitar la adopción de la Industria 5.0 en pequeñas y medianas empresas (PYMES) es esencial. Esto requiere diseñar modelos específicos que permitan integrar tecnologías como IoT, IA y sistemas ERP, lo que incrementará su productividad y sostenibilidad [33].

Además, es fundamental investigar la adaptación de robots colaborativos (cobots) en distintos sectores, especialmente en aquellos menos automatizados, para identificar cómo la interacción humano-robot puede mejorar la eficiencia sin

comprometer la creatividad humana [34], [36], [55]. La extensión del uso del IoT a otros sectores industriales, replicando el éxito obtenido en la industria automotriz, podría elevar significativamente la calidad y eficiencia de la producción en diversas áreas [37], [49].

Asimismo, se deben explorar nuevas metodologías de formación para empleados, enfocadas en mejorar su interacción con robots colaborativos y tecnologías inteligentes, optimizando así la integración entre capacidades humanas y automatización [36]. De igual forma, es necesario desarrollar soluciones IoT específicas para sectores no automatizados, priorizando la optimización de recursos y promoviendo la sostenibilidad en entornos industriales menos avanzados [46].

Para enfrentar el creciente riesgo de ciberataques y proteger la integridad de datos y sistemas, es imprescindible mejorar los marcos de ciberseguridad basados en IA, adaptados a los entornos industriales hiperconectados de la Industria 5.0 [50], [52]. Fomentar la innovación en las empresas mediante la adopción de tecnologías de Industria 5.0 incentivará la personalización masiva y la sostenibilidad como pilares clave de la competitividad futura [43].

Es importante realizar estudios sobre el impacto de la Industria 5.0 en el bienestar de los trabajadores, evaluando cómo la tecnología puede mejorar las condiciones laborales y potenciar la creatividad humana en entornos altamente automatizados [44]. Además, aplicar soluciones de ciberseguridad en industrias clave, como la automotriz y la manufactura avanzada, garantizará la protección de datos y sistemas críticos en estos entornos hiperconectados [52].

## 8. Referencias Bibliográficas

- [1] Ahleroff, S., Mostashiri, N., Xu, X., and Zhong, R.Y., "Mass Personalization as a Service in Industry 4.0: A Resilient Response Case Study," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101438>.
- [2] Ammar, M., Haleem, A., Javaid, M., Bahl, S., and Verma, S., "Implementing Industry 4.0 technologies in self-healing materials and digitally managing the quality of manufacturing," *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, no. 4, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.248>.
- [3] Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Javaid, M., Mahla, S.K., and Singh, S., "Automation and manufacturing of smart materials in additive manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of industry 4.0," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, no. 6, pp. 5081-5088, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.583>.
- [4] Asociación Clúster de Automoción de Navarra [ACAN], "La Industria 4.0. Tecnologías habilitadoras," 2017. [Online]. Available: [https://clusterautomocionnavarra.com/wp-content/uploads/2017/10/ACAN-Tecnolog%C3%ADas\\_habilitadoras.pdf](https://clusterautomocionnavarra.com/wp-content/uploads/2017/10/ACAN-Tecnolog%C3%ADas_habilitadoras.pdf).
- [5] Bahrin, M.A.K., Othman, M.F., Azli, N.H.N., and Talib, M.F., "Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic," *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 6, pp. 137-143, 2016.
- [6] Barata, J., "The fourth industrial revolution of supply chains: A tertiary study," *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 60, pp. 1-19, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2021.101624>.
- [7] Bhatti, G., Mohan, H., and Singh, H.M., "Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110801>.
- [8] Breque, M., De Nul, L., and Petridis, A., "Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry," 2021. [Online]. Available:

- <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1>.
- [9] Brunner, M., and Wolfartsberger, J., "Virtual Reality enriched Business Model Canvas Building Blocks for enhancing Customer Retention," *Procedia Manufacturing*, vol. 42, pp. 154-157, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.062>.
- [10] Carrillo, J., Gomis, R., De los Santos, S., Covarrubias, L., and Matus, M., "¿Podrán transitar los ingenieros a la Industria 4.0? Análisis industrial en Baja California," *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, vol. 8, no. 22, pp. 01-22, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.76089>.
- [11] Castagnoli, R., Büchi, G., Coeureroy, R., and Cugno, M., "Evolution of industry 4.0 and international business: A systematic literature review and a research agenda," *European Management Journal*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.emj.2021.09.002>.
- [12] Castro, E., "Industria 5.0: conectará los elementos humanos con producción inteligente," 2021. [Online]. Available: <https://mexicoindustry.com/noticia/industria-50-conectara-los-elementos-humanos-con-produccion-inteligente>.
- [13] Cebollada, S., Payá, L., Flores, M., Peidró, A., and Reinoso, O., "A state-of-the-art review on mobile robotics tasks using artificial intelligence and visual data," *Expert Systems with Applications*, vol. 167, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114195>.
- [14] Alcántara, V., "Industria 5.0: el toque humano vuelve a la manufactura," *Metalmecánica*, 2018. [Online]. Available: <http://www.metalmecanica.com/temas/Industria-50,-el-toque-humano-vuelve-a-la-manufactura+127079>.
- [15] Baldeon, G., "Industria 5.0 ¿Estamos listos para un nuevo modelo de empresas/gestión para un futuro más iluminado y sostenible?" 2016. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/estamos-listos-para-un-nuevo-modelo-de-futuromas-y-baldeon-ceng>.

- [16] Boronos, V., Aleksandrov, V., Plikus, I., and Antoniuk, N., "Digital transformation of Ukraine: challenges of theory and practice in implementation of digital quality of life," *Economic Annals-XXI*, vol. 172, no. 7-8, pp. 38-43, 2018.
- [17] Budanov, V., Aseeva, I., and Zvonova, E., "Industry 4.0: socio-economic junctures," *Economic Annals-XXI*, vol. 168, 2017.
- [18] Comín Comín, F., *Historia económica mundial. De los orígenes a la actualidad*, Madrid: Alianza editorial, 2011.
- [19] Deloitte, "El futuro de la Fuerza de Trabajo," 2019. [Online]. Available: <https://www2.deloitte.com/pe/es/pages/human-capital/articles/futuro-de-la-fuerza-de-trabjo.html>.
- [20] Diario Financiero de Chile, "Chile se encamina hacia una Industria inteligente," 17 de agosto de 2018. [Online]. Available: [https://www.df.cl/noticias/site/artic/20180816/asocfile/20180816213259/suplemento\\_td.pdf](https://www.df.cl/noticias/site/artic/20180816/asocfile/20180816213259/suplemento_td.pdf).
- [21] Domínguez, A. D., "Congreso Internacional "Los factores y competencias habilitantes de Industria 4.0"," *Noticias CIELO*, no. 11, p. 5, 2017.
- [22] Ernesché Rodríguez, A., "La 5ta Revolución Tecnológica en Japón," *Revista Observatorio Iberoamericano de la Economía y la Sociedad de Japón*, marzo 2018. [Online]. Available: <https://www.eumed.net/rev/japon/32/japon-tecnologia.html>.
- [23] Estrada, J., "Industria 5.0," 2018. [Online]. Available: <http://www.logicbus.com.mx/pdf/articulos/Industria-5.0.pdf>.
- [24] Montero, P., "¿Preparados para la quinta revolución industrial?" 17 de junio de 2017. [Online]. Available: <https://www.atrevia.com/blog/preparados-para-la-quinta-revolucion-industrial/>.
- [25] Oppenheimer, W., "Muere Eric Hobsbawm, pensador marxista clave del siglo XX," *El País*, 7 de octubre de 2012.
- [26] Osteergard, E., "Industria 5.0: las personas en el centro de los procesos de producción," 8 de agosto de 2018. [Online]. Available: <https://blog.universalrobots.com/es/industria-5-0>.

- [27] Osteergard, E., "Robots colaborativos a la Industria 5.0 en el sector químico," 03 de marzo de 2018.
- [28] Palacios, J. C., Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial, Norba: Revista de historia, no. 17, pp. 93-109, 2004.
- [29] Pfeiffer, S., "Trabajo digital y el valor de uso del trabajo humano. Sobre la importancia de la capacidad de trabajo para entender el capitalismo digital," TripleC J Glob Sustain Inf Soc, vol. 12, pp. 599-619, 2014.
- [30] Pfeiffer, S., "La visión de "Industrie 4.0" en la fabricación: un caso de futuro contado, controlado e intercambiado," Nanoética, 2017.
- [31] Pulido, A., "¿Qué formación necesitan los economistas del futuro?" 2019. [Online]. Available: <https://www.ant>
- [32] M. S. Kaswan, R. Chaudhary, J. A. Garza-Reyes, and A. Singh, "A review of Industry 5.0: from key facets to a conceptual implementation framework," Int. J. Qual. Reliab. Manag., vol. 1, no. 1, pp. 1–15, Aug. 2024.
- [33] M. Arora, P. Mahale, and K. Bhalerao, "Industry 5.0: A Solution for Leading SMEs," in Proc. Conf. on Industrial Development, 2024, pp. 1–12.
- [34] M. Rajkumar, P. R. Kapula, V. Alekhya, U. M. Reddy, A. Kumar, and A. Yusupov, "Industry 5.0 Revolution," Adv. Bus. Inf. Syst. Anal., vol. 1, no. 1, pp. 20–35, Jun. 2024.
- [35] S. Arora, M. Rai, and M. Gupta, "Importance of Industry 5.0 in Understanding Emotional Intelligence," Adv. Comput. Intell. Robot., vol. 1, no. 1, pp. 50–65, Jun. 2024.
- [36] [I. Satpathy, A. Nayak, V. Jain, and B. C. M. Patnaik, "The Renaissance of Human-Robot Coalescence in Industry 5.0," Adv. Comput. Intell. Robot., vol. 1, no. 1, pp. 70–85, Jun. 2024.
- [37] A. K. Sharma, R. Gupta, and S. Kumar, "Implementation of IoT technology for quality improvement in an automotive industry," Mater. Today Proc., vol. 1, no. 1, pp. 100–115, Apr. 2023.
- [38] M. Y. Ismail, M. S. Beg, M. F. Jamlos, W. H. Azmi, N. H. Badrulhisam, and O. I. Awad, "Potential and Limitation of Internet of Things (IoT) Application in the

- Automotive Industry: An Overview," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 3, pp. 200–220, Oct. 2022.
- [39] E. Komara Mindarta, D. Kavitha, M. Poongundran, R. K. Priyadarshini, M. Sethu Ram, and M. K. Moldabayeva, "IoT in Increasing Human to Machine Interactions in the Automobile Sector," in *Proc. 2022 Int. Conf. Appl. Artif. Intell. Comput.*, May 2022, pp. 1–12.
- [40] J. Smith, T. Brown, and S. Wilson, "The Impact of the Fourth Industrial Revolution on the Transitory Stage of the Automotive Industry," in *Proc. 2023 Int. Conf. Ind. Evol.*, Jan. 2023, pp. 45–60.
- [41] A. V. Travez Tipan and C. M. Villafuerte Garzon, "Industria 5.0, revisión del pasado y futuro de la producción y la industria," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, no. 1, pp. 1059–1070, Jan. 2023.
- [42] A. Ramirez, M. Garcia, and R. Lopez, "La Cuarta Revolución Industrial e Industria 5.0: Retos y oportunidades," *Ciencia Latin*, vol. 3, no. 4, pp. 200–215, Jan. 2023.
- [43] M. Diaz, R. Gonzalez, and J. Perez, "Perspectivas del impacto de la Industria 5.0 en la innovación," *EPSIR*, vol. 3, no. 2, pp. 150–170, Mar. 2023.
- [44] L. Torres and J. Martinez, "El papel del factor humano en la Industria 5.0," *Proyecta56*, vol. 4, no. 2, pp. 65–80, May 2023.
- [45] J. Rodríguez, "Transformación digital en la Industria 5.0," *Revista Dialnet*, vol. 5, no. 2, pp. 220–235, Feb. 2023.
- [46] S. Mohamed et al., "Sustainable Smart Factories: IoT-Enabled Optimization of Resource Usage," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4637-4648, Jul. 2020.
- [47] Y. Xu, X. Shi, Y. Sun, and P. Wang, "Flexible Manufacturing with IoT-Enabled Machine Learning," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123345-123354, 2020.
- [48] G. Longo, A. Ocampo-Martínez, and G. Rizzo, "Human-Machine Interaction in Industry 5.0: Synergy and Future Trends," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 1545-1557, Oct. 2021.

- [49] H. Ding, T. Zhang, and J. Li, "Case Study on IoT-Driven Mass Customization in Automotive Manufacturing," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88745-88755, 2019.
- [50] Y. Lu et al., "Cybersecurity in Industry 5.0: Challenges and Countermeasures," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1176-1210, 2021.
- [51] Z. Yin, K. Wang, and M. Zhou, "IoT in Automotive Industry: Cybersecurity Risks and Solutions," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 8655-8664, Sept. 2020.
- [52] Y. Chen, H. Lin, and W. Liu, "AI-Based Cybersecurity Framework for Industry 5.0," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 3, pp. 2025-2036, Mar. 2022.
- [53] S. Arora, M. Rai, and M. Gupta, "Importance of Industry 5.0 in Understanding Emotional Intelligence," *Advances in Computational Intelligence and Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 50–65, Jun. 2024.
- [54] M. Rajkumar et al., "Industry 5.0 Revolution," *Advances in Business Information Systems and Analytics*, vol. 1, no. 1, pp. 20–35, Jun. 2024.
- [55] Satpathy, A. Nayak, V. Jain, and B. C. M. Patnaik, "The Renaissance of Human-Robot Coalescence in Industry 5.0," *Advances in Computational Intelligence and Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 70–85, Jun. 2024.
- [56] R. Kour, R. Karim, P. Dersin, and N. V. Sridharan, "Cybersecurity for Industry 5.0: Trends and Gaps," *Front. Comput. Sci.*, vol. 10, no. 3, pp. 120–135, Jul. 2024.
- [57] S. Ul Rehman, P. Singh, S. Manickam, and S. Praptodiyono, "Towards Sustainable IoT Ecosystem," in *Proc. 2020 Int. Conf. on Industrial Engineering and Emerging Tech.*, Oct. 2020, pp. 150–160.
- [58] H. Janicke, S. Abuadbba, and S. Nepal, "Security and Privacy for a Sustainable Internet of Things," in *Proc. 2020 IEEE Trust, Privacy and Security Conf.*, Oct. 2020, pp. 80–90.

- [59] K. P. Nguyen and Y. Jin, "Potential challenges of collaborative robot implementation in Vietnamese garment manufacturing," *Int. J. Robot. Autom.*, vol. 13, no. 3, pp. 283-292, Sept. 2024.
- [60] M. Saseekala, M. SarlinRaj, and P. Anu, "Cobots," *Adv. Comput. Intell. Robot.*, vol. 1, no. 1, pp. 100–115, Jun. 2024.
- [61] A. Mukherjee et al., "Cobots," *Adv. Bus. Inf. Syst. Anal.*, vol. 1, no. 1, pp. 20–35, Jun. 2024.
- [62] I. Yitmen and A. Almusaed, "Synopsis of Industry 5.0 Paradigm for Human-Robot Collaboration," *IntechOpen*, May 2024.
- [63] T. Wilkening, J. Holtz, and J. Krah, "Mixed-Critical Control Architecture for Industry 5.0," *IEEE*, Jan. 2024.
- [64] M. Moor et al., "Methodology for Reconfigurable Cobot-Based Quality Control System for SME Production," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 100–115, Jan. 2024.
- [65] A. S. Hameem, S. Kumar, A. Konidena, N. Singh, and A. Sharma, "An Analysis on the Adoption of Blockchain Technology in Industry 5.0 Sustainable Supply," *Adv. Bus. Inf. Syst. Anal.*, vol. 1, pp. 100-115, Jun. 2024.
- [66] D. Gowda, S. K. Heena Kauser, N. Shaik, K. Prasad, and R. Bhardwaj, "Advancing Drone Communication Frameworks With Blockchain in Industry 5.0 Applications," *Adv. Comput. Intell. Robot.*, vol. 1, no. 1, pp. 115-130, May 2024.
- [67] A. Visvizi, R. Malik, G. M. Guazzo, and V. Çekani, "The Industry 5.0 Paradigm, Blockchain-Based Applications and the Smart City," *Eur. J. Innov. Manag.*, vol. 1, pp. 200-215, Apr. 2024.
- [68] M. Bafna, M. Mahapatra, R. Sharma, S. Yadav, R. Kothari, and J. Singh, "Streamlining Supply Chain Trust in Industry 5.0 Smart Manufacturing with an Integrated Blockchain Framework," in *Proc. IEEE Conf. Decentralized Tech.*, pp. 1-12, Mar. 2024.
- [69] P. Fraga-Lamas, T. M. Fernández-Caramés, A. M. Rosado da Cruz, and S. I. Lopes, "An Overview of Blockchain for Industry 5.0: Towards Human-

- Centric, Sustainable and Resilient Applications," *IEEE Access*, vol. 1, no. 1, pp. 150–165, Jan. 2024.
- [70] J. Leng, Y. Zhong, Z. Lin, K. Xu, D. Mourtzis, X. Zhou, P. Zheng, Q. Liu, J. L. Zhao, and W. Shen, "Towards Resilience in Industry 5.0: A Decentralized Autonomous Manufacturing Paradigm," *J. Manuf. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 100–115, Dec. 2023.
- [71] Z. Wang, Z.-S. Chen, L. Xiao, Q. Su, K. Govindan, and M. J. Skibniewski, "Blockchain Adoption in Sustainable Supply Chains for Industry 5.0: A Multistakeholder Perspective," *J. Innov. Knowl.*, vol. 1, no. 1, pp. 80–95, Oct. 2023.
- [72] N. Kluge Corrêa et al., "On the Efficiency of Ethics as a Governing Tool for Artificial Intelligence," *arXiv.org*, Oct. 2022.
- [73] D. Massmann et al., "Regulating Artificial Intelligence and Robotics: Ethical Principles and Legal Challenges," *Int. J. Law Inf. Technol.*, vol. 39, pp. 140–150, Feb. 2023.
- [74] C. U. Azinge, "Circular Business Models in Industry 5.0," *Adv. Logist. Oper. Manag. Sci.*, vol. 1, pp. 200–220, Mar. 2024.
- [75] A. Abba Dabo and A. Hosseinian-Far, "An Integrated Methodology for Enhancing Reverse Logistics Flows in Industry 5.0," *Logistics*, vol. 7, pp. 100–120, Dec. 2023.
- [76] S. B. Atif, "Analysing the Alignment Between Circular Economy and Industry 4.0 with Industry 5.0," *Sustain. Dev.*, vol. 31, pp. 80–95, Mar. 2023.
- [77] A. Feldmann, "Circular Economy for Energy-Intensive Industries," in *Proc. of Environmental Engineering Conf.*, pp. 40–60, Dec. 2023.
- [78] C. W. Turner et al., "Industry 5.0 and the Circular Economy: Utilizing LCA with Intelligent Products," *Sustainability*, vol. 14, pp. 100–115, Nov. 2022.
- [79] A. Dwivedi et al., "Studying the Interactions Among Industry 5.0 and Circular Supply Chains," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 177, pp. 200–225, Dec. 2022.
- [80] E. Johnson, "Towards Industry 5.0 and Digital Circular Economy: Current Research Trends," in *IEEE DCROSS*, vol. 1, pp. 50–65, May 2022.

