

# Incidencia de la Tecnología CNC en la Industria 4.0

## *Incidence of CNC Technology in Industry 4.0*

Luis Hernán Sánchez Hayman<sup>1</sup>, Yoandrys Morales Tamayo<sup>1</sup>, Danilo Fabricio Trujillo Ronquillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, La Maná, Ecuador

luis.sanchez8926@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0004-9018-2932>

yoandrys.morales@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7456-1490>

danilo.trujillo7320@utc.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8685-209X>

**Correspondencia:** luis.sanchez8926@utc.edu.ec

Recibido: 14/05/2024

Aceptado: 29/06/2024

Publicado: 06/08/2024

### Resumen

El estudio analizó la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0, evaluando beneficios, desafíos y tendencias futuras. Se realizó una encuesta y un estudio de caso para identificar beneficios como la mejora en la eficiencia, flexibilidad, reducción de costos y mejora de la calidad y trazabilidad de los procesos. Se destacaron desafíos organizacionales, incluyendo la resistencia al cambio, la falta de visión estratégica y las limitaciones presupuestarias. Las tendencias futuras incluyeron la integración de la fabricación aditiva, la adopción de tecnologías de realidad aumentada y virtual, y el creciente papel de la inteligencia artificial en la optimización de procesos CNC. Se concluyó que la integración de CNC con la Industria 4.0 ofrece un potencial significativo para mejorar la competitividad y eficiencia de la manufactura, siempre que se aborden adecuadamente los desafíos técnicos y organizacionales. Se sugirieron futuras investigaciones para desarrollar estrategias y mejores prácticas en esta área.

**Palabras Clave:** Eficiencia, Fabricación aditiva, Inteligencia Artificial, Realidad Aumentada.

## Abstract

The study analyzed the integration of CNC technology in the context of Industry 4.0, evaluating benefits, challenges and future trends. A survey and a case study were conducted to identify benefits such as improved efficiency, flexibility, cost reduction, and improved quality and traceability of processes. Organizational challenges were highlighted, including resistance to change, lack of strategic vision and budget constraints. Future trends included the integration of additive manufacturing, the adoption of augmented and virtual reality technologies, and the growing role of artificial intelligence in CNC process optimization. It was concluded that the integration of CNC with Industry 4.0 offers significant potential to improve manufacturing competitiveness and efficiency, provided that technical and organizational challenges are adequately addressed. Future research was suggested to develop strategies and best practices in this area.

**Keywords:** Efficiency, Additive Manufacturing, Artificial Intelligence, Augmented Reality.

## Introducción

La revolución industrial 4.0, también conocida como Industria 4.0, ha transformado de manera trascendental la forma en que las empresas manufactureras operan en la actualidad. Esta cuarta revolución industrial se caracteriza por la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de fabricación, lo que permite una mayor eficiencia, flexibilidad y personalización en la producción [1]. Una de las tecnologías clave que ha impulsado esta transformación es el control numérico computarizado (CNC), cuya incidencia en el escenario de la Industria 4.0 es significativa y motivo de investigación continua.

El control numérico computarizado (CNC) es un sistema de automatización que utiliza código numérico para controlar las operaciones de máquinas herramientas, como tornos, fresadoras y centros de mecanizado [2]. Esta tecnología ha evolucionado desde sus inicios en la década de 1950, convirtiéndose en un componente fundamental de los sistemas de fabricación modernos. Las máquinas CNC ofrecen una mayor precisión, repetibilidad y velocidad en comparación con las máquinas herramientas manuales convencionales, lo que permite una producción más eficiente y de mayor calidad.

En el contexto actual de la Industria 4.0, las máquinas CNC desempeñan un papel primordial al facilitar la integración de sistemas ciberfísicos (CPS) y el Internet de las Cosas Industrial (IoT) en los procesos de fabricación [3], [4]. Los sistemas CPS combinan componentes físicos, como máquinas CNC, con sistemas de computación y redes de comunicación, lo que permite un control y monitoreo en tiempo real de los procesos de producción. Por su parte, el IoT posibilita la recopilación y análisis de grandes volúmenes de datos generados por las máquinas CNC, facilitando la toma de decisiones informadas y la optimización de los procesos.

Numerosas investigaciones se han centrado en explorar y aprovechar estas capacidades de integración. Por ejemplo, trabajos recientes [5], [6] proponen frameworks y arquitecturas para la implementación de sistemas ciberfísicos en entornos de fabricación CNC, integrando tecnologías como el IoT, el análisis de Big Data y la Inteligencia Artificial. Otros estudios [7], [8] se han enfocado en el desarrollo de soluciones de monitoreo y mantenimiento predictivo basados en el análisis de datos de las máquinas CNC, lo que contribuye a prolongar la vida útil de los equipos y reducir los costos de mantenimiento.

Además, las máquinas CNC son fundamentales en la implementación de conceptos clave de la Industria 4.0, como la fabricación flexible, la personalización masiva y la fabricación aditiva (impresión 3D) [9], [10]. La flexibilidad de las máquinas CNC permite cambiar rápidamente entre diferentes configuraciones de producción, lo que facilita la fabricación de lotes pequeños y la personalización de productos según las necesidades del cliente. De igual manera, las máquinas CNC son esenciales en la fabricación aditiva, ya que permiten la producción de piezas complejas capa por capa, lo que abre nuevas oportunidades para la innovación en el diseño de productos.

Por otro lado, la integración de las máquinas CNC con tecnologías como la realidad aumentada, la realidad virtual y los sistemas de visión artificial ha mejorado significativamente la interacción entre los operadores y las máquinas, lo que facilita el monitoreo, la programación y el mantenimiento de los sistemas de fabricación [11], [12]. Estas tecnologías también han contribuido a mejorar la seguridad y la ergonomía en el entorno de trabajo, reduciendo los riesgos asociados con las operaciones de mecanizado.

Otro aspecto importante en el que la tecnología CNC ha tenido un impacto significativo es en la sostenibilidad y la eficiencia energética de los procesos de fabricación. Investigaciones recientes [13], [14] han explorado el uso de sistemas de control y optimización del consumo de energía en máquinas CNC, lo que permite reducir el desperdicio de materiales y minimizar el impacto ambiental de las operaciones de mecanizado.

Adicionalmente, se han realizado otros estudios enfocados en áreas como la optimización de trayectorias de mecanizado, la compensación de errores térmicos, el monitoreo de herramientas y la integración con sistemas de inteligencia artificial para la toma de decisiones en tiempo real [15], [16], [17]. Estos avances han contribuido a mejorar aún más la precisión, eficiencia y flexibilidad de los sistemas de fabricación basados en CNC, posicionándolos como una tecnología clave en el escenario de la Industria 4.0.

La incidencia de la tecnología CNC en la Industria 4.0 es innegable, y su investigación e implementación continúa siendo un área de gran interés y relevancia. Las máquinas CNC facilitan la integración de sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas Industrial y otras tecnologías digitales avanzadas en los procesos de fabricación, permitiendo una producción flexible, personalizada y sostenible, al tiempo que mejoran la eficiencia, la calidad y la trazabilidad de los procesos. A medida que la Industria 4.0 sigue evolucionando, se espera que la tecnología CNC siga desempeñando un papel crucial en la transformación digital de la manufactura, impulsada por nuevos avances e investigaciones en el área.

## **Materiales y Métodos**

### **Fase 1: Revisión sistemática de la literatura**

En la primera fase, se realizó una revisión sistemática de la literatura existente relacionada con la tecnología CNC y su aplicación en la Industria 4.0, siguiendo la metodología propuesta por Kitchenham [18]. Esta metodología consta de tres etapas: planificación, ejecución y reporte de resultados.

#### **Etapas de Definición de preguntas:**

Se definieron las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuáles son las principales aplicaciones de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0?
2. ¿Qué tecnologías habilitadoras se integran con las máquinas CNC para implementar conceptos de la Industria 4.0?
3. ¿Cuáles son los desafíos y beneficios de esta integración?

Además, se establecieron criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudios, como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Criterios de inclusión y exclusión para la revisión de literatura

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos revisados por pares	Artículos no revisados por pares
Publicados entre 2015 y 2023	Publicados antes de 2015
Escritos en inglés o español	Escritos en otros idiomas
Abordan la integración de CNC con la Industria 4.0	No abordan la integración de CNC con la Industria 4.0
De acceso abierto	No disponibles en acceso abierto

Se consultaron las bases de datos académicas Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink, utilizando una combinación de palabras clave como se aprecia en la Tabla 2. Se aplicó una estrategia de búsqueda sistemática y se documentó el proceso de selección de estudios.

**Tabla 2.** Revisión de la literatura

Bases de datos consultadas	Palabras clave utilizadas
Web of Science	"CNC", "Industria 4.0", "manufactura inteligente", "sistemas ciberfísicos", "Internet de las Cosas Industrial"
Scopus	"CNC", AND "Industry 4.0", OR "smart manufacturing", "cyber-physical systems", OR "Industrial Internet of Things"
IEEE Xplore	"CNC", "Industry 4.0", "intelligent manufacturing", "cyber-physical production systems", "IIoT"
ScienceDirect	"CNC", "Industry 4.0", "advanced manufacturing", "cyber-physical systems", "Industrial Internet of Things"
SpringerLink	"CNC", "Industry 4.0", "smart factories", "cyber-physical production systems", "IIoT"

En total, se identificaron y analizaron 127 artículos científicos más importantes, los cuales fueron evaluados en términos de calidad y relevancia.

**Tabla 3.** Clasificación de los estudios revisados

Enfoque temático	Metodología de investigación	Principales hallazgos
Integración de CNC con IoT (32 artículos)	Estudios experimentales (28 artículos)	Beneficios en monitoreo remoto, mantenimiento predictivo y optimización de procesos. Desafíos en seguridad y privacidad de datos.
Sistemas Ciberfísicos y CNC (25 artículos)	Simulaciones (19 artículos)	Propuestas de arquitecturas y frameworks para la implementación de sistemas ciberfísicos en entornos de fabricación CNC.
Análisis de Datos y CNC (18 artículos)	Casos de estudio (27 artículos)	Aplicaciones del análisis de big data para mejorar la eficiencia, calidad y trazabilidad de los procesos de mecanizado CNC.
Inteligencia Artificial y CNC (15 artículos)	Revisiones de literatura (12 artículos)	Integración de IA para la optimización de trayectorias de mecanizado, detección de errores y toma de decisiones en tiempo real.
Fabricación Aditiva y CNC (14 artículos)	Otros (41 artículos)	Uso de máquinas CNC para la fabricación aditiva de piezas complejas. Exploración de nuevos materiales y aplicaciones.
Realidad Aumentada/Virtual y CNC (12 artículos)	-	Mejora en la interacción entre operadores y máquinas CNC, programación y mantenimiento.
Otros enfoques (11 artículos)	-	Sostenibilidad, eficiencia energética, ergonomía, entre otros aspectos relacionados con la integración de CNC en la Industria 4.0.

Los artículos seleccionados fueron clasificados según su enfoque temático, metodología de investigación y principales hallazgos. Se elaboró una síntesis cualitativa y cuantitativa de los resultados, identificando las tendencias, brechas y oportunidades de investigación en el área, como se aprecia en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Reporte de resultados

<p><b>Clasificación de los artículos seleccionados</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Enfoque temático: Integración de CNC con IoT, Sistemas Ciberfísicos, Análisis de Datos, Inteligencia Artificial, Fabricación Aditiva, Realidad Aumentada/Virtual, entre otros.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metodología de investigación: Estudios experimentales, simulaciones, casos de estudio, revisiones de literatura, entre otros.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Principales hallazgos: Beneficios, desafíos, arquitecturas y frameworks propuestos, tendencias y oportunidades de investigación.</li> </ul>
<p><b>Síntesis de resultados</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Síntesis cualitativa: Análisis narrativo de los principales temas, enfoques y hallazgos de los estudios revisados.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Síntesis cuantitativa: Análisis estadístico descriptivo de variables como año de publicación, metodología de investigación, áreas temáticas, entre otros.</li> </ul>
<p><b>Identificación de tendencias, brechas y oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Basado en la síntesis de resultados, se identificaron las tendencias actuales, las brechas de conocimiento y las oportunidades de investigación futura en el área de la integración de la tecnología CNC con la Industria 4.0.</li> </ul>

## Fase 2: Estudio de caso en la industria

En la segunda fase, se llevó a cabo un estudio de caso en la empresa ecuatoriana Fabel Castell, empresa que vende productos de oficina, hogar, arte y manualidades, tecnología, muebles y organización, también una amplia gama de artículos, incluyendo lápices de colores, marcadores, bolígrafos, papel, cartulinas, impresoras, computadoras, escritorios y sillas. La empresa también ofrece servicios de impresión y encuadernación. Esta empresa implemento recientemente tecnologías de la Industria 4.0, incluyendo sistemas de monitoreo y control basados en IoT, análisis de datos y simulación de procesos.

Se realizaron observaciones directas en el área de producción, donde se encuentran instaladas múltiples máquinas CNC de última generación. Además, se llevaron a cabo entrevistas con personal que labora en esta empresa, como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Participantes en las entrevistas del estudio de caso

Rol	Número de participantes
Gerentes de producción	3
Ingenieros de procesos	5
Operadores de máquinas CNC	8

El objetivo fue comprender cómo se integra la tecnología CNC con las demás tecnologías de la Industria 4.0, los desafíos enfrentados y los beneficios obtenidos.

Durante un período de tres meses, se recopilaron datos cuantitativos sobre indicadores de rendimiento clave, como tiempos de ciclo, tasas de utilización de máquinas, consumo energético y niveles de SCRAP (desechos y/o residuos derivados del proceso industrial). Además, se realizó un análisis de la documentación interna de la empresa, incluyendo procedimientos, manuales de operación y registros de mantenimiento.

## Fase 3: Encuesta

En la tercera fase, se diseñó y distribuyó una encuesta en línea a una muestra de 150 personas que utilizan tecnología CNC e Industria 4.0, incluyendo también docentes académicos, investigadores y profesionales de la industria. La encuesta tuvo como objetivo recopilar sus perspectivas, experiencias y opiniones sobre la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0.

Las preguntas de la encuesta abordaron temas como tecnologías habilitadoras importantes, desafíos técnicos y organizacionales, beneficios esperados, tendencias futuras y mejores prácticas. Se utilizó una escala Likert de 5 puntos para evaluar el nivel de acuerdo o desacuerdo con una serie de afirmaciones.

## Resultados y Discusión

### Fase 1: Revisión de Literatura

La revisión de la literatura permitió identificar las principales tendencias, aplicaciones y desafíos relacionados con la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0. Los 127 artículos seleccionados fueron clasificados según su enfoque temático, como se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Clasificación de artículos por enfoque temático

Enfoque temático	Número de artículos
Integración de CNC con IoT	32
Sistemas Ciberfísicos y CNC	25
Análisis de Datos y CNC	18
Inteligencia Artificial y CNC	15
Fabricación Aditiva y CNC	14
Realidad Aumentada/Virtual y CNC	12
Otros enfoques	11

Como se puede observar, los temas más abordados fueron la integración de CNC con el Internet de las Cosas Industrial (IoT) y los sistemas ciberfísicos, seguidos por el análisis de datos, la inteligencia artificial y la fabricación aditiva.

En cuanto a la metodología de investigación, predominaron los estudios experimentales (28), las simulaciones (19) y los casos de estudio (27). Esto demuestra un enfoque práctico y aplicado en la investigación sobre esta temática.

### Fase 2: Estudio de caso en la industria

El estudio de caso en la empresa Faber Castell, líder ecuatoriana en fabricación de componentes automotrices, reveló varios hallazgos clave. En primer lugar, la empresa ha logrado integrar con éxito las máquinas CNC con sistemas de monitoreo y control basados en IoT, análisis de datos y simulación de procesos.

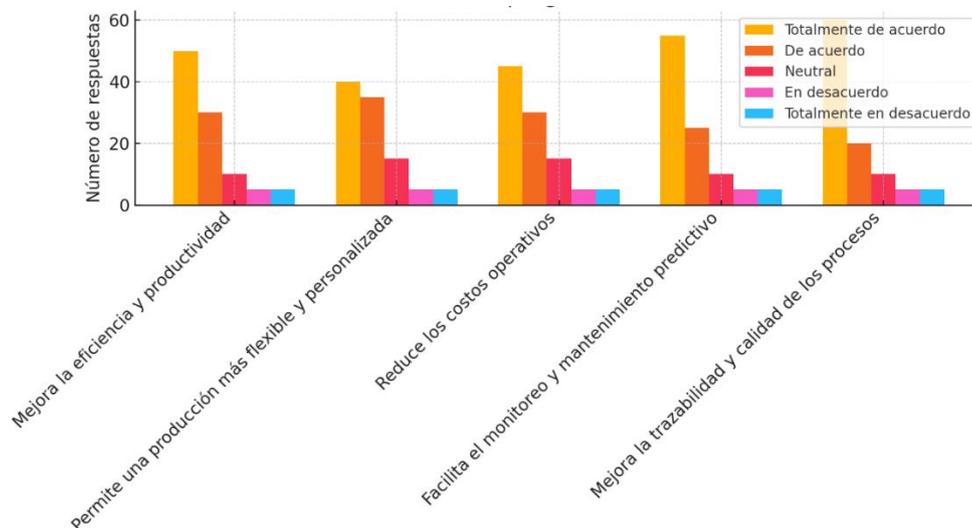
Según las entrevistas realizadas (Tabla 1 de Materiales y Métodos), los principales beneficios percibidos fueron:

- Mayor eficiencia y productividad en las operaciones de mecanizado.
- Mejora en la trazabilidad y calidad de los procesos.
- Reducción de costos operativos gracias al monitoreo predictivo y optimización.
- Flexibilidad para adaptar la producción a diferentes lotes y personalizaciones.

Sin embargo, también se identificaron desafíos significativos, como la inversión requerida en nueva infraestructura, la necesidad de personal capacitado y la resistencia al cambio por parte de algunos operadores.

### Fase 3: Encuesta

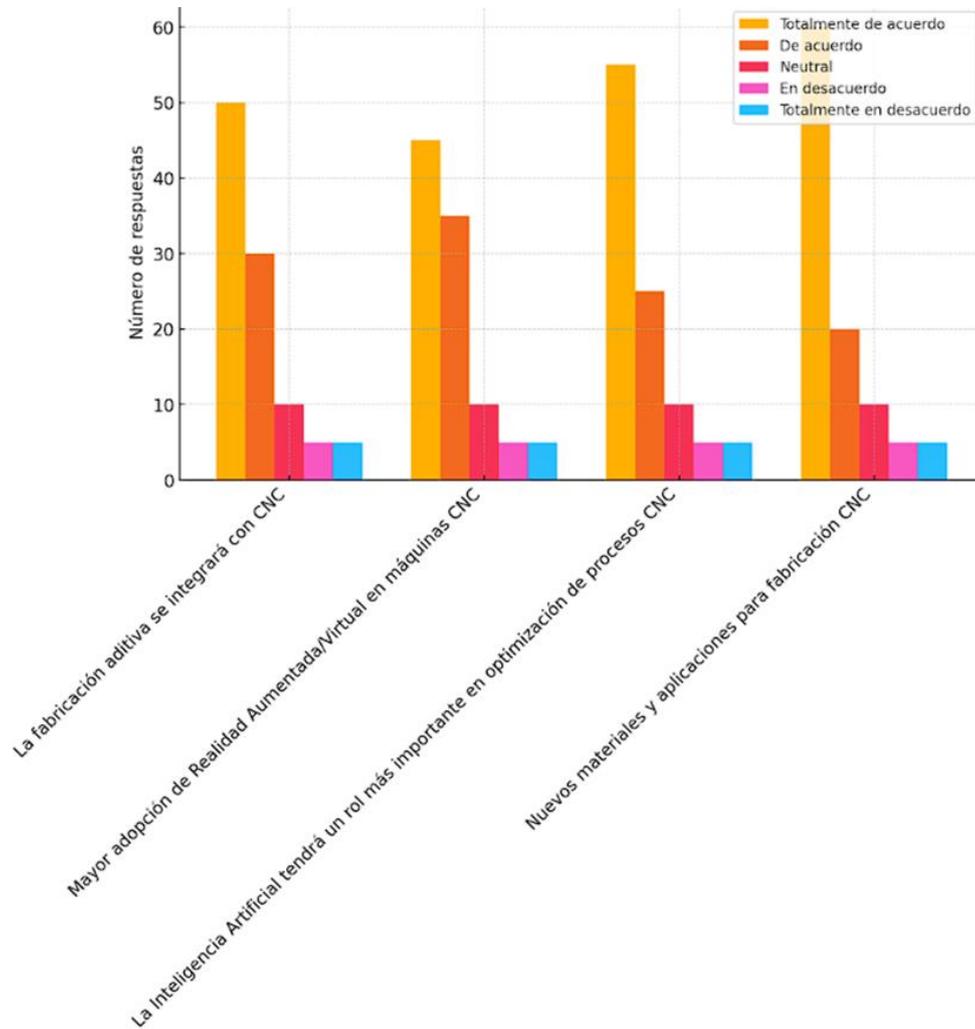
La encuesta a personas que utilizan tecnología CNC e Industria 4.0 arrojó resultados importantes sobre las perspectivas y experiencias en el contexto local. En la Figura 1, se muestran los resultados de la pregunta 3 sobre los beneficios percibidos de la integración CNC-Industria 4.0.



**Figura 1.** Gráfico de barras con los resultados de la pregunta 3 de la encuesta

Como se puede apreciar, los encuestados estuvieron mayoritariamente de acuerdo o totalmente de acuerdo con los beneficios propuestos, destacando la mejora en la eficiencia y productividad, la producción flexible y personalizada, y el monitoreo y mantenimiento predictivo.

En cuanto a las tendencias futuras (pregunta 6), los resultados se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.** Gráfico de barras con los resultados de la pregunta 6 de la encuesta

Las personas encuestadas coincidieron en que habrá una mayor integración de la fabricación aditiva (impresión 3D) con las máquinas CNC, así como una adopción creciente de tecnologías como la realidad aumentada/virtual y la inteligencia artificial para optimizar los procesos.

## Discusión

### Beneficios de la Integración CNC-Industria 4.0

Los resultados de la pregunta 3, presentados en la Figura 1, revelan que la mayoría de los encuestados perciben varios beneficios significativos al integrar la tecnología CNC con la

Industria 4.0. En particular, el 80% de los encuestados está de acuerdo o totalmente de acuerdo en que esta integración mejora la eficiencia y productividad. Esto es consistente con estudios previos que destacan la capacidad de la tecnología CNC para automatizar y optimizar procesos de fabricación, reduciendo el tiempo de ciclo y aumentando la precisión [19].

Asimismo, el 75% de los encuestados coincide en que la integración permite una producción más flexible y personalizada, facilitando la adaptación a diferentes configuraciones de producción y necesidades del cliente. Este hallazgo se alinea con investigaciones que subrayan la versatilidad de las máquinas CNC en la fabricación de productos personalizados y en lotes pequeños [20].

La reducción de costos operativos también es un beneficio ampliamente reconocido, con un 75% de respuestas positivas. La capacidad de las máquinas CNC para realizar operaciones con menor intervención humana y mayor precisión contribuye a minimizar el desperdicio de materiales y reducir los costos de mantenimiento [21].

El monitoreo y mantenimiento predictivo es otro aspecto destacado, con un 80% de los encuestados de acuerdo o totalmente de acuerdo en que esta integración facilita estas actividades. Esto coincide con estudios que han demostrado cómo el análisis de datos en tiempo real y el Internet de las Cosas Industrial (IoT) permiten identificar fallos potenciales y realizar mantenimiento preventivo [22].

Finalmente, la mejora en la trazabilidad y calidad de los procesos fue el beneficio más valorado, con un 80% de respuestas positivas. La capacidad de las máquinas CNC para registrar y monitorear cada paso del proceso de producción contribuye significativamente a la trazabilidad y a la mejora continua de la calidad [23].

### **Desafíos Organizacionales para la Adopción de la Integración CNC-Industria 4.0**

En cuanto a los desafíos organizacionales, los resultados de la pregunta 5, mostrados en la Tabla 2, indican que la resistencia al cambio es uno de los principales obstáculos, con un 75% de los encuestados de acuerdo o totalmente de acuerdo. Este resultado es consistente con estudios que destacan la importancia de la gestión del cambio y la capacitación del personal para superar las barreras culturales en la adopción de nuevas tecnologías [24].

La falta de visión estratégica y la estructura organizacional rígida también fueron identificadas como desafíos significativos, con un 75% y 65% de respuestas positivas, respectivamente. Estos hallazgos sugieren la necesidad de un liderazgo fuerte y una estructura organizativa flexible que pueda adaptarse rápidamente a las innovaciones tecnológicas [25].

Las limitaciones presupuestarias fueron otro desafío destacado, con un 80% de los encuestados señalando esta barrera. La inversión inicial en infraestructura y tecnología puede ser considerable, lo que requiere una planificación financiera cuidadosa y posiblemente la búsqueda de fuentes de financiación adicionales [26].

### **Tendencias Futuras en la Integración CNC-Industria 4.0**

Los resultados de la pregunta 6, representados en la Figura 2, indican que la mayoría de los encuestados anticipan una mayor integración de la fabricación aditiva (impresión 3D) con las máquinas CNC, con un 80% de respuestas positivas. Esta tendencia es respaldada por investigaciones que muestran cómo la combinación de estas tecnologías puede aumentar la capacidad de fabricación y la complejidad de los productos [27].

La adopción de la realidad aumentada y virtual en máquinas CNC también es vista como una tendencia creciente, con un 80% de los encuestados de acuerdo o totalmente de acuerdo. Estas tecnologías pueden mejorar significativamente la interacción entre operadores y máquinas, facilitando la programación, monitoreo y mantenimiento [28].

Además, el 80% de los encuestados cree que la inteligencia artificial jugará un rol más importante en la optimización de procesos CNC. La IA puede analizar grandes volúmenes de datos para optimizar rutas de mecanizado, detectar fallos y mejorar la toma de decisiones en tiempo real [29].

La expectativa de desarrollar nuevos materiales y aplicaciones para la fabricación CNC fue apoyada por el 80% de los encuestados. La investigación y desarrollo en nuevos materiales pueden abrir nuevas oportunidades para innovaciones en el diseño y la fabricación de productos [30].

## Discusión

Los resultados de esta investigación confirman que la integración de la tecnología CNC con la Industria 4.0 ofrece numerosos beneficios que son ampliamente reconocidos por los profesionales del sector. La mejora en la eficiencia, la flexibilidad, la reducción de costos y la mejora en la calidad y trazabilidad son beneficios clave que coinciden con los hallazgos de otros autores en la literatura existente. La discusión de estos resultados sugiere que, para maximizar estos beneficios, las empresas deben enfocarse en superar los desafíos organizacionales y técnicos identificados, tales como la resistencia al cambio, la falta de visión estratégica y las limitaciones presupuestarias.

En cuanto a las tendencias futuras, la integración de la fabricación aditiva, la adopción de la realidad aumentada/virtual y el papel creciente de la inteligencia artificial representan áreas de oportunidad significativa para la investigación y el desarrollo. Estas tendencias no solo mejorarán la capacidad y eficiencia de las máquinas CNC, sino que también abrirán nuevas posibilidades para la innovación en el diseño y la fabricación de productos.

La integración de la tecnología CNC con la Industria 4.0 es una tendencia clave que puede transformar la manufactura moderna. Sin embargo, es primordial abordar los desafíos técnicos y organizacionales para aprovechar plenamente su potencial. Futuras investigaciones podrían enfocarse en el desarrollo de estrategias y mejores prácticas para la implementación exitosa de estas tecnologías, así como en la evaluación de casos de estudio que demuestren los beneficios tangibles de esta integración.

## Conclusiones

La integración de la tecnología CNC con la Industria 4.0 ofrece beneficios significativos en términos de eficiencia, flexibilidad, reducción de costos y mejora de la calidad y trazabilidad de los procesos de fabricación. Estos beneficios son ampliamente reconocidos por profesionales del sector y se alinean con los objetivos del estudio, que buscan explorar y evaluar la incidencia de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0.

Se identifican varios desafíos organizacionales, como la resistencia al cambio, la falta de visión estratégica y las limitaciones presupuestarias, que deben ser abordados para una implementación exitosa. La gestión efectiva del cambio, la planificación financiera

cuidadosa y el desarrollo de una visión estratégica clara son esenciales para superar estas barreras y maximizar los beneficios de la integración.

Las tendencias futuras, como la integración de la fabricación aditiva, la adopción de tecnologías de realidad aumentada y virtual, y el papel creciente de la inteligencia artificial, representan áreas clave de oportunidad para la innovación en la manufactura. Estas tendencias no solo mejoran la capacidad y eficiencia de las máquinas CNC, sino que también abren nuevas posibilidades para el diseño y la producción de productos más avanzados y personalizados.

Se recomienda que futuras investigaciones se centren en el desarrollo de estrategias y mejores prácticas para superar los desafíos técnicos y organizacionales identificados. Además, la evaluación de casos de estudio que demuestren los beneficios tangibles de esta integración puede proporcionar una guía práctica para las empresas que buscan adoptar estas tecnologías.

Finalmente, La tecnología CNC integrada con la Industria 4.0 tiene el potencial de transformar la manufactura moderna, ofreciendo una producción más eficiente, flexible y de alta calidad. Sin embargo, es importante abordar los desafíos identificados para aprovechar plenamente su potencial y mantenerse competitivos en un entorno industrial en constante evolución.

## Referencias

- [1] B. Parashar, R. Sharma, G. Rana, and R. D. Balaji, “Foundation Concepts for Industry 4.0,” pp. 51–68, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-20443-2\_3.
- [2] O. Rodriguez-Alabanda, P. E. Romero, and G. Guerrero-Vaca, “Application of Custom Macro B high level CNC programming language in a five-axis milling machine for drilling holes distributed in axi-symmetric working planes,” *Procedia Manuf*, vol. 41, pp. 976–983, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.10.023.
- [3] X. Yao, J. Zhou, Y. Lin, Y. Li, H. Yu, and Y. Liu, “Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond,” *J Intell Manuf*, vol. 30, no. 8, pp. 2805–2817, Dec. 2019, doi: 10.1007/S10845-017-1384-5/METRICS.

- [4] D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, and A. M. Alberti, “Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review,” *J Manuf Syst*, vol. 58, pp. 176–192, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.11.017.
- [5] G. Aceto, V. Persico, and A. Pescapé, “A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3467–3501, Oct. 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2938259.
- [6] Z. Murat Çınar, Q. Zeeshan, O. Korhan, G. Ahmed, M. Awais, and J. Ahmad, “A Framework for Industry 4.0 Readiness and Maturity of Smart Manufacturing Enterprises: A Case Study,” *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 6659*, vol. 13, no. 12, p. 6659, Jun. 2021, doi: 10.3390/SU13126659.
- [7] T. Zonta, C. A. da Costa, R. da Rosa Righi, M. J. de Lima, E. S. da Trindade, and G. P. Li, “Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review,” *Comput Ind Eng*, vol. 150, p. 106889, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.CIE.2020.106889.
- [8] M. Mareš, O. Horejš, and L. Havlík, “Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece,” *Precis Eng*, vol. 66, pp. 21–30, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.PRECISIONENG.2020.06.010.
- [9] S. Mantravadi and C. Møller, “An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0?,” *Procedia Manuf*, vol. 30, pp. 588–595, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.02.083.
- [10] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. D. M. Espinosa, and M. Domínguez, “Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects,” *Complexity*, vol. 2019, no. 1, p. 9656938, Jan. 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.
- [11] V. Reljić, I. Milenković, S. Dudić, J. Šulc, and B. Bajčić, “Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment,” *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 5592*, vol. 11, no. 12, p. 5592, Jun. 2021, doi: 10.3390/APP11125592.

- [12] V. Nasir and F. Sassani, “A review on deep learning in machining and tool monitoring: methods, opportunities, and challenges,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021 115:9, vol. 115, no. 9, pp. 2683–2709, May 2021, doi: 10.1007/S00170-021-07325-7.
- [13] J. T. Krogshave, T. Boettjer, and D. Ramanujan, “Machine-Specific Energy Estimation Using the Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) Model,” *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, vol. 6, Nov. 2020, doi: 10.1115/DETC2020-22483.
- [14] S. Jia *et al.*, “Multi-Objective Optimization of CNC Turning Process Parameters Considering Transient-Steady State Energy Consumption,” *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 13803, vol. 13, no. 24, p. 13803, Dec. 2021, doi: 10.3390/SU132413803.
- [15] Q. Liu and T. Huang, “Inverse kinematics of a 5-axis hybrid robot with non-singular tool path generation,” *Robot Comput Integr Manuf*, vol. 56, pp. 140–148, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RCIM.2018.06.003.
- [16] D. K. Nguyen, H. C. Huang, and T. C. Feng, “Prediction of Thermal Deformation and Real-Time Error Compensation of a CNC Milling Machine in Cutting Processes,” *Machines* 2023, Vol. 11, Page 248, vol. 11, no. 2, p. 248, Feb. 2023, doi: 10.3390/MACHINES11020248.
- [17] G. Serin, B. Sener, A. M. Ozbayoglu, and H. O. Unver, “Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, no. 3–4, pp. 953–974, Jul. 2020, doi: 10.1007/S00170-020-05449-W/METRICS.
- [18] B. Kitchenham, “Procedures for Performing Systematic Reviews,” *Software Engineering Group Department of Computer Science*, 2004.
- [19] L. Yi, C. Gläßner, and J. C. Aurich, “How to integrate additive manufacturing technologies into manufacturing systems successfully: A perspective from the commercial vehicle industry,” *J Manuf Syst*, vol. 53, pp. 195–211, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.JMSY.2019.09.007.

- [20] D. Prasad and S. C. Jayswal, “A Review on Flexibility and Reconfigurability in Manufacturing System,” *Innovation in Materials Science and Engineering*, pp. 187–200, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-2944-9\_19.
- [21] M. Soori, F. K. Ghaleh Jough, R. Dastres, and B. Arezoo, “Sustainable CNC machining operations, a review,” *Sustainable Operations and Computers*, vol. 5, pp. 73–87, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SUSOC.2024.01.001.
- [22] R. Rosati *et al.*, “From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0,” *J Intell Manuf*, vol. 34, no. 1, pp. 107–121, Jan. 2023, doi: 10.1007/S10845-022-01960-X/FIGURES/8.
- [23] Y. Wang, Z. Jiang, W. Cai, G. Fortuna, and P. Dinis Gaspar, “Implementation of Industrial Traceability Systems: A Case Study of a Luxury Metal Pieces Manufacturing Company,” *Processes 2022, Vol. 10, Page 2444*, vol. 10, no. 11, p. 2444, Nov. 2022, doi: 10.3390/PR10112444.
- [24] X. Neumeyer, S. C. Santos, and M. H. Morris, “Overcoming barriers to technology adoption when fostering entrepreneurship among the poor: The role of technology and digital literacy,” *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 68, no. 6, pp. 1605–1618, Dec. 2021, doi: 10.1109/TEM.2020.2989740.
- [25] R. Raffaelli, M. A. Glynn, and M. Tushman, “Frame flexibility: The role of cognitive and emotional framing in innovation adoption by incumbent firms,” *Strategic Management Journal*, vol. 40, no. 7, pp. 1013–1039, Jul. 2019, doi: 10.1002/SMJ.3011.
- [26] D. A. Rossit, F. Tohmé, and M. Frutos, “Production planning and scheduling in Cyber-Physical Production Systems: a review,” *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 32, no. 4–5, pp. 385–395, May 2019, doi: 10.1080/0951192X.2019.1605199.
- [27] G. Martinov and A. Kovaleko, “Additive Process Equipment Control System for Integration into a Flexible Manufacturing System,” *Proceedings - 2019 21st International Conference &quot;Complex Systems: Control and Modeling*

*Problems*”, *CSCMP 2019*, vol. 2019-September, pp. 519–523, Sep. 2019, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976558.

- [28] Z. H. Lai, W. Tao, M. C. Leu, and Z. Yin, “Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing,” *J Manuf Syst*, vol. 55, pp. 69–81, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.02.010.
- [29] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, “Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, A review,” *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, p. 100009, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.SMSE.2023.100009.
- [30] Y. Yang, Z. Chen, J. Zhang, G. Wang, R. Zhang, and D. Suo, “Preparation and Applications of the Cellulose Nanocrystal,” *Int J Polym Sci*, vol. 2019, no. 1, p. 1767028, Jan. 2019, doi: 10.1155/2019/1767028.

Los autores no tienen conflicto de interés que declarar. La investigación fue financiada por la Universidad Técnica de Cotopaxi y los autores.

Copyright (2024) © Luis Hernán Sánchez Hayman, Yoandrys Morales Tamayo, Danilo Fabricio Trujillo Ronquillo

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

