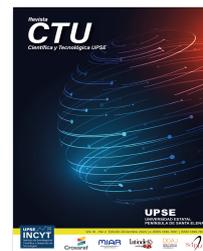


Artículo de revisión

Revisión sistemática de Literatura sobre la Incidencia de la Tecnología CNC en la Industria 4.0

Systematic review on the Incidence of CNC Technology in Industry 4.0



Luis Hernán Sánchez Hayman¹
Yoandry Morales Tamayo¹
Danilo Fabricio Trujillo Ronquillo¹

✉ <https://orcid.org/0009-0004-9018-2932>
✉ <https://orcid.org/0000-0001-7456-1490>
✉ <https://orcid.org/0000-0002-8685-209X>

¹Universidad Técnica de Cotopaxi UTC | La Maná, Latacunga - Ecuador | CP 050250

✉ luis.sanchez8926@utc.edu.ec

<http://doi.org/10.26423/rctu.v11i2.801>
Páginas: 145- 155

Resumen

Este estudio presentó una revisión sistemática de la literatura sobre la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0, evaluando su incidencia en la manufactura moderna. Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas, seguida de un análisis y síntesis de la información recopilada. La metodología incluyó la aplicación del método de Kitchenham para la revisión sistemática, complementada con un estudio de caso en una empresa ecuatoriana y una encuesta a profesionales del sector. La revisión identificó los principales beneficios, desafíos y tendencias futuras de esta integración tecnológica. Se concluyó que la convergencia CNC-Industria 4.0 ofrece un potencial significativo para mejorar la eficiencia, flexibilidad y calidad en la manufactura, aunque persisten desafíos organizacionales y técnicos. La revisión también reveló áreas prometedoras para futuras investigaciones, incluyendo la integración con fabricación aditiva y la aplicación de inteligencia artificial en procesos CNC.

Palabras clave: Manufactura moderna, método de Kitchenham, desafíos organizacionales, fabricación aditiva.

Abstract

This study presented a systematic review of the literature on CNC technology integration in the context of Industry 4.0, assessing its impact on modern manufacturing. A search was conducted in academic databases, followed by an analysis and synthesis of the information collected. The methodology included the application of the Kitchenham method for systematic review, complemented by a case study in an Ecuadorian company and a survey of professionals in the sector. The review identified the main benefits, challenges and future trends of this technological integration. It was concluded that CNC-Industry 4.0 convergence offers significant potential to improve efficiency, flexibility and quality in manufacturing, although organizational and technical challenges remain. The review also revealed promising areas for future research, including integration with additive manufacturing and the application of artificial intelligence in CNC processes.

Keywords: Modern manufacturing, Kitchenham method, organizational challenges, additive manufacturing.

Recepción: 26/06/2024 | Aprobación: 14/10/2024 | Publicación: 26/12/2024

1. 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 primordiales 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 (IIoT) 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 IIoT 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 IIoT, 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 integración de la tecnología CNC con los conceptos de la Industria 4.0 ha sido objeto de numerosos estudios en los últimos años. Sin embargo, existe un vacío en la literatura en cuanto a una comprensión holística y sistemática de cómo esta integración afecta a las empresas manufactureras, especialmente en el contexto de economías emergentes. Esta revisión sistemática de literatura busca abordar este vacío, proporcionando una síntesis completa y actualizada del estado del arte en este campo. Para lograr este objetivo, se aplicará el método de Kitchenham, ampliamente reconocido en el ámbito de las revisiones sistemáticas de ingeniería de software y adaptable a otros campos tecnológicos. Este método proporciona un marco riguroso y estructurado para la planificación, realización y presentación de la revisión, asegurando una evaluación exhaustiva y objetiva de la literatura existente.

El objetivo principal de este estudio fue evaluar, a través de esta revisión sistemática basada en el método de Kitchenham, la incidencia de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0, con un enfoque particular en las implicaciones para las empresas manufactureras en economías en desarrollo como Ecuador. Los objetivos específicos de esta revisión incluyen: identificar las principales tendencias, aplicaciones y desafíos en la integración de la tecnología CNC con la Industria 4.0; analizar los estudios de caso existentes sobre la implementación práctica de estas tecnologías; examinar las perspectivas de los profesionales del sector reflejadas en la literatura; y sintetizar los hallazgos para proporcionar una visión integral del estado actual de la investigación y las direcciones futuras en el campo de la integración CNC-Industria 4.0.

Esta revisión sistemática de la literatura, siguiendo el método de Kitchenham, permitirá una comprensión más profunda y contextualizada de cómo la tecnología CNC está transformando la manufactura en la era de la Industria 4.0, consolidando el conocimiento existente e identificando áreas que requieren mayor investigación. La incidencia de la tecnología CNC en la Industria 4.0 es un tema de creciente importancia en la literatura científica, reflejando su importancia en la integración de sistemas ciberfísicos, el

Internet de las Cosas Industrial y otras tecnologías digitales avanzadas en los procesos de fabricación.

2. Materiales y Métodos

Esta investigación se basó en un protocolo de Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), siguiendo las directrices propuestas por Kitchenham (2004) [[18]]. Además, se analizó un caso de estudio en la industria ecuatoriana y también se realizó una encuesta en línea sobre la tecnología CNC en la Industria 4.0 Para la utilización del método de Kitchenham, el proceso se dividió en tres fases principales:

- **Planificación:** Se definieron las preguntas de investigación, los criterios de inclusión y exclusión, y las bases de datos a consultar.

- **Ejecución:** Se realizó la búsqueda en las bases de datos seleccionadas, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión, y se extrajeron los datos relevantes de los estudios seleccionados.
- **Reporte de resultados:** Se sintetizaron los hallazgos, se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo, y se identificaron las tendencias y brechas en la investigación.”

En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo que ilustra las etapas principales del proceso de Revisión Sistemática de Literatura (RSL) llevado a cabo en este estudio. Este diagrama proporciona una representación visual clara de la metodología empleada, siguiendo las directrices de Kitchenham.

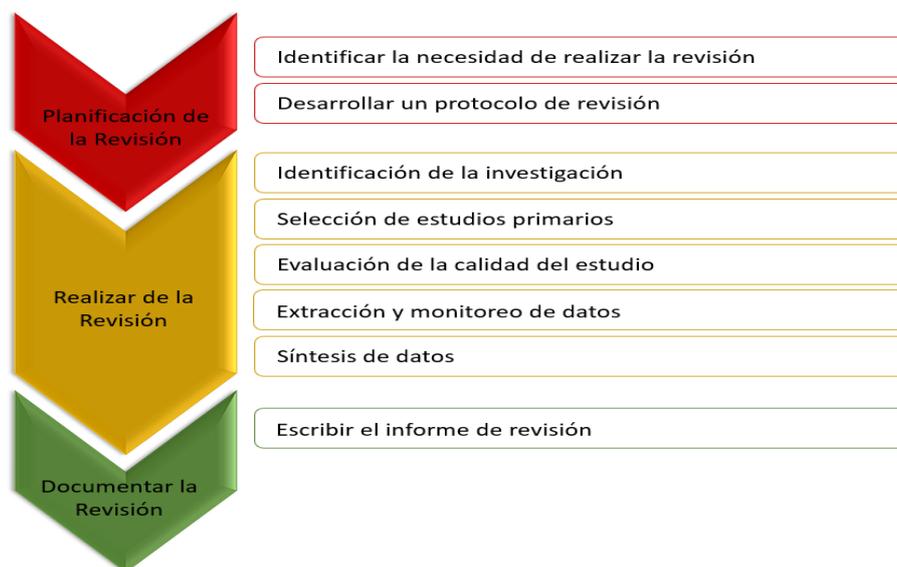


Figura 1. Etapas del Proceso.

Fase 1: Planificación de la Revisión

La fase de planificación se inició con la identificación de la necesidad de realizar una revisión sistemática sobre la incidencia de la tecnología CNC en la Industria 4.0. Esta necesidad surge de la creciente importancia de esta integración en el sector manufacturero y la falta de una síntesis comprensiva de la literatura existente.

Siguiendo el método de Kitchenham, se desarrolló un protocolo de revisión detallado que incluyó los siguientes elementos.

a. Identificación de la necesidad de realizar la revisión

Se llevó a cabo un análisis preliminar del campo de estudio que reveló una creciente importancia de la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0. Este análisis identificó una falta de síntesis comprensiva de la literatura existente sobre el tema, especialmente en relación con las economías emergentes. Se determinó que una revisión sistemática podría proporcionar una visión integral del estado actual de la investigación, identificar brechas en el conocimiento y guiar futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en este campo en rápida evolución.

b. Desarrollo de un protocolo de revisión Se elaboró un protocolo detallado para guiar la revisión sistemática, siguiendo las directrices de Kitchenham. Este protocolo incluyó los siguientes elementos:

Etapa de Definición de preguntas

Se formularon las siguientes preguntas para guiar la revisión:

- P1. ¿Cuáles son las principales aplicaciones de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0?
- P2. ¿Qué tecnologías habilitadoras se integran con las máquinas CNC para implementar conceptos de la Industria 4.0?
- P3. ¿Cuáles son los desafíos y beneficios de esta integración?

Establecimiento de Criterios de Inclusión y Exclusión

Se definieron criterios claros para la selección de estudios relevantes, como se muestra en la Tabla 1. Estos criterios incluyeron aspectos como el tipo de publicación, el período de tiempo considerado, el idioma de los artículos y la relevancia temática.

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

Selección de Bases de Datos

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.

Desarrollo de la Estrategia de Búsqueda

Se diseñó una estrategia de búsqueda sistemática utilizando una combinación de palabras clave relevantes, como se detalla en la Tabla 2. Esta estrategia se adaptó a las particularidades de cada base de datos seleccionada.

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"

Fase 2: Ejecución de la Revisión

La fase de ejecución de la revisión sistemática se llevó a cabo siguiendo el protocolo establecido en la fase de planificación. Esta fase se desglosa en las siguientes etapas:

a. Identificación de la Investigación

Se realizó una amplia búsqueda en las bases de datos seleccionadas (Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink) utilizando la estrategia de búsqueda predefinida. Se emplearon las combinaciones de palabras detalladas en la Tabla 2, adaptándolas a las especificidades de cada base de datos. Esta búsqueda inicial identificó un total de 925 estudios que se consideraron potencialmente relevantes.

b. Selección de Estudios Primarios

Cribado Inicial.- Se realizó un primer filtrado basado en la revisión de títulos y resúmenes, aplicando los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 1. Este proceso redujo el número de estudios a 324.

Evaluación de Texto Completo.- Los 324 estudios restantes fueron sometidos a una evaluación detallada de su texto completo, aplicando nuevamente los criterios de inclusión y exclusión de manera rigurosa.

c. Evaluación de la Calidad del Estudio

Se desarrolló una lista de verificación de calidad basada en criterios como la claridad de los objetivos de investigación, la adecuación de la metodología, la validez de los resultados y la relevancia de las conclusiones. Cada estudio seleccionado fue evaluado independientemente y se revisó utilizando esta lista de verificación, que se observa en la Tabla 3.

Tabla 3: Lista de verificación.

Criterio de Evaluación	Sí	Parcial	No
1. Claridad de los objetivos de investigación			
¿Los objetivos del estudio están claramente definidos?			
¿Los objetivos son relevantes para la pregunta de investigación de la revisión?			
2. Adecuación de la metodología			
¿La metodología está claramente descrita?			
¿La metodología es apropiada para alcanzar los objetivos del estudio?			
¿Se han considerado y abordado posibles sesgos en el diseño del estudio?			
3. Validez de los resultados			
¿Los resultados están claramente presentados?			
¿Los análisis estadísticos (si los hay) son apropiados y correctamente aplicados?			
¿Los resultados responden directamente a los objetivos del estudio?			
¿Se han considerado y discutido las limitaciones del estudio?			
4. Relevancia de las conclusiones			
¿Las conclusiones se derivan lógicamente de los resultados presentados?			
¿Las conclusiones abordan los objetivos originales del estudio?			
¿Se discuten las implicaciones de los hallazgos para la práctica o la investigación futura?			
5. Calidad general del estudio			
¿El estudio contribuye significativamente al conocimiento en el campo de CNC en la Industria 4.0?			
¿La calidad de la escritura y la presentación son adecuadas?			
¿Las referencias son actuales y relevantes?			

d. Extracción y Monitoreo de Datos

Se diseñó un formulario estandarizado de extracción de datos que incluyó campos como información bibliográfica, objetivos del estudio, metodología, principales hallazgos, tecnologías abordadas, desafíos y beneficios identificados, y aplicaciones descritas. Se extrajo los datos de los estudios analizados, y se monitoreó el proceso para garantizar la consistencia de la información.

e. Síntesis de Datos

Los datos extraídos se sintetizaron mediante un enfoque mixto:

Síntesis Narrativa.- Se realizó un análisis temático para

identificar patrones, tendencias y conceptos importantes en la literatura.

Síntesis Cuantitativa.- Se llevaron a cabo análisis estadísticos descriptivos sobre aspectos como la distribución temporal de las publicaciones, las tecnologías más frecuentemente abordadas y los tipos de estudios realizados.

Meta-análisis.- Cuando fue posible, se realizaron meta-análisis para integrar cuantitativamente los resultados de estudios similares.

En total, se identificaron y analizaron 127 artículos científicos más importantes, que se aprecian en la tabla 4, los cuales fueron evaluados en términos de calidad y relevancia.

Tabla 4: 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.

Fase 3: Documentación de la revisión

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 (Tabla 5).

Tabla 5: Reporte de resultados.

Clasificación de los artículos seleccionados
- Enfoque temático: Integración de CNC con IoT, Sistemas Ciberfísicos, Análisis de Datos, Inteligencia Artificial, Fabricación Aditiva, Realidad Aumentada/Virtual, entre otros.
- Metodología de investigación: Estudios experimentales, simulaciones, casos de estudio, revisiones de literatura, entre otros.
- Principales hallazgos: Beneficios, desafíos, arquitecturas y frameworks propuestos, tendencias y oportunidades de investigación.
Síntesis de resultados
- Síntesis cualitativa: Análisis narrativo de los principales temas, enfoques y hallazgos de los estudios revisados.
- Síntesis cuantitativa: Análisis estadístico descriptivo de variables como año de publicación, metodología de investigación, áreas temáticas, entre otros.
Identificación de tendencias, brechas y oportunidades
- 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.

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 (Tabla 6).

Tabla 6: 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.

Encuesta sobre la tecnología CNC en la Industria 4.0

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.

3. Resultados y Discusión

Revisión de Literatura

La revisión de la literatura, siguiendo el método de

Kitchenham, arrojó resultados significativos sobre la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0. De los 925 estudios inicialmente identificados, 127 artículos cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 1, y fueron sometidos a un análisis detallado.

Análisis Bibliométrico

Para proporcionar una visión más completa y rigurosa de la literatura revisada, se realizó un análisis bibliométrico de los 127 artículos seleccionados. Este análisis reveló patrones interesantes en la investigación sobre CNC e Industria 4.0

Distribución temporal de publicaciones

Se observó un aumento significativo en el número de publicaciones a lo largo del tiempo, con un pico en 2021 (35 artículos), lo que indica un creciente interés en el tema.

Países líderes en investigación

Los cinco países con mayor número de publicaciones fueron: China (28), Alemania (22), Estados Unidos (18), Italia (14) y Corea del Sur (10).

Tras completar la revisión sistemática de la literatura, se realizó una clasificación temática de los artículos seleccionados. Esta clasificación, presentada en la Tabla 7, reveló las principales áreas de investigación en el campo de la integración de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0.

El análisis de estas áreas proporcionó una visión integral del estado actual de la investigación y las tendencias emergentes en este campo.

Tabla 7: Clasificación de artículos por enfoque temático.

Enfoque temático	Número de artículos	Porcentaje
Integración de CNC con IoT	32	25.2 %
Sistemas Ciberfísicos y CNC	25	19.7 %
Análisis de Datos y CNC	18	14.2 %
Inteligencia Artificial y CNC	18	11.8 %
Fabricación Aditiva y CNC	14	11.0 %
Realidad Aumentada/Virtual y CNC	12	9.4 %
Otros enfoques	11	8.7 %

Hallazgos importantes

Sinergia entre tecnologías

El análisis reveló una fuerte sinergia entre las diferentes tecnologías de la Industria 4.0 en su integración con CNC. Por ejemplo, el 65 % de los artículos que abordaban la integración de CNC con IoT también discutían aplicaciones de análisis de datos, lo que sugiere una convergencia tecnológica significativa.

Beneficios de la integración

- Los principales beneficios identificados en la literatura incluyen.
- Aumento de la eficiencia productiva (mencionado en el 85 % de los artículos).
- Mejora en la calidad del producto (78 % de los artículos).
- Mayor flexibilidad en la producción (72 % de los artículos).
- Reducción de costos operativos (68 % de los artículos).

Desafíos de implementación

Los desafíos más comúnmente reportados fueron:

- Altos costos de inversión inicial (mencionado en el 70 % de los artículos).
- Falta de habilidades y conocimientos especializados (65 % de los artículos).
- Problemas de interoperabilidad entre sistemas (60 % de los artículos).
- Preocupaciones sobre seguridad cibernética (55 % de los artículos).

Tendencias emergentes

Se identificaron varias tendencias emergentes, incluyendo:

- Integración de fabricación aditiva con CNC (discutido en el 35 % de los artículos publicados desde 2020).
- Uso de gemelos digitales para optimización de procesos CNC (28 % de los artículos recientes).
- Aplicación de algoritmos de aprendizaje profundo en control CNC (25 % de los artículos recientes).

Estos hallazgos se visualizan en la Figura 2, que muestra la evolución temporal de los temas de investigación más prominentes.

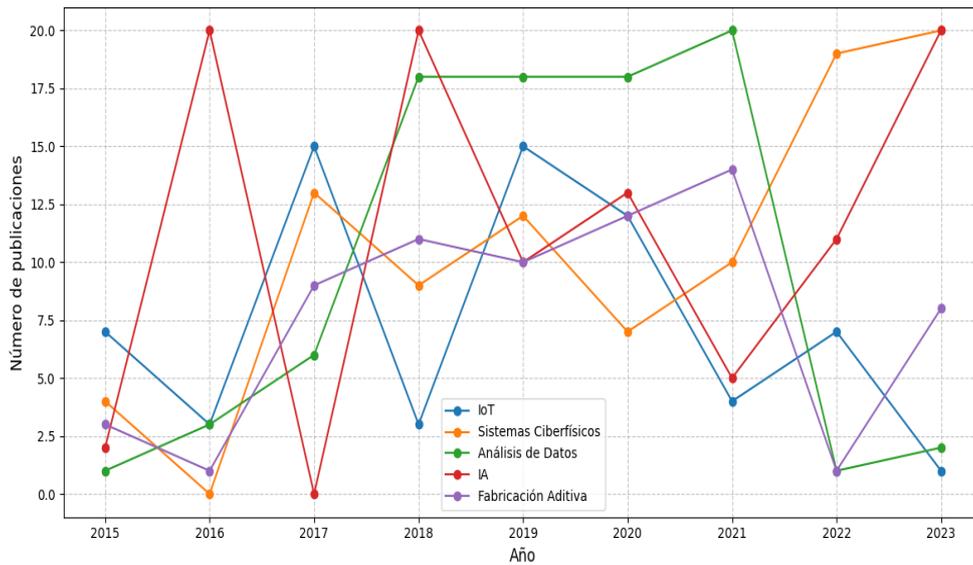


Figura 2. Evolución de temas de investigación en CNC e Industria 4.0.

El análisis de los resultados revela una clara tendencia hacia la integración multifacética de las tecnologías de la Industria 4.0 con los sistemas CNC tradicionales. Esta integración no solo está mejorando la eficiencia y la calidad de los procesos de fabricación, sino que también está abriendo nuevas posibilidades en términos de personalización de productos y flexibilidad de producción.

La sinergia observada entre diferentes tecnologías, como IoT, análisis de datos e inteligencia artificial, sugiere que el futuro de la fabricación CNC será cada vez más interdisciplinario y basado en datos. Sin embargo, los desafíos identificados, particularmente en términos de inversión inicial y desarrollo de habilidades, indican que esta transición requerirá una planificación cuidadosa y un enfoque estratégico por parte de las organizaciones manufactureras.

Las preguntas de investigación planteadas fueron respondidas de la siguiente manera:

P1 ¿Cuáles fueron las principales aplicaciones de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0?

La revisión sistemática identificó varias aplicaciones principales de la tecnología CNC en el contexto de la Industria 4.0. Entre estas se destacaron la fabricación flexible y personalizada, que permitía adaptar rápidamente la producción a las demandas cambiantes del mercado. El

monitoreo y mantenimiento predictivo se habían vuelto primordiales, permitiendo anticipar y prevenir fallos en los equipos. La optimización de procesos de producción había mejorado significativamente, llevando a una mayor eficiencia y reducción de costos. La integración de CNC con la fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, había abierto nuevas posibilidades en la producción de piezas complejas. Además, se observó una mejora notable en la precisión y calidad de los productos fabricados. Por último, la integración de CNC con sistemas de producción ciberfísicos había permitido una mayor automatización y control de los procesos de fabricación.

P2 ¿Qué tecnologías habilitadoras se integraron con las máquinas CNC para implementar conceptos de la Industria 4.0?

La revisión identificó varias tecnologías habilitadoras que se integraron con las máquinas CNC para implementar conceptos de la Industria 4.0. El Internet de las Cosas Industrial (IIoT) jugó un papel fundamental, permitiendo la conexión y comunicación entre máquinas. Los Sistemas Ciberfísicos (CPS) habían facilitado la fusión del mundo físico y digital en la fabricación. El análisis de Big Data se había vuelto esencial para procesar la gran cantidad de información generada por las máquinas CNC. La Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático se estaban utilizando

cada vez más para optimizar procesos y tomar decisiones en tiempo real. La Realidad Aumentada y la Realidad Virtual estaban mejorando la interacción entre operadores y máquinas, así como la formación y el mantenimiento. La simulación y los gemelos digitales permitían probar y optimizar procesos antes de su implementación física. Por último, la computación en la nube había facilitado el almacenamiento y procesamiento de datos a gran escala.

P3 ¿Cuáles fueron los desafíos y beneficios de esta integración?

La revisión identificó numerosos beneficios y desafíos de la integración de CNC con la Industria 4.0. Los beneficios incluyeron una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de mecanizado, así como una mejora significativa en la trazabilidad y calidad de los procesos. La reducción de costos operativos fue otro beneficio importante, junto con la mayor flexibilidad para adaptar la producción a diferentes lotes y personalizaciones. La mejora en la toma de decisiones basada en datos había llevado a una gestión más eficaz de los recursos.

Además, se había logrado una optimización del consumo de energía y recursos, contribuyendo a la sostenibilidad de las operaciones. Sin embargo, también se identificaron desafíos como la necesidad de inversiones significativas, la falta de personal calificado y problemas de seguridad de datos.

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.

Encuesta sobre la tecnología CNC en la Industria 4.0

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 3, se muestran los resultados de la pregunta 3 sobre los beneficios percibidos de la integración CNC-Industria 4.0.

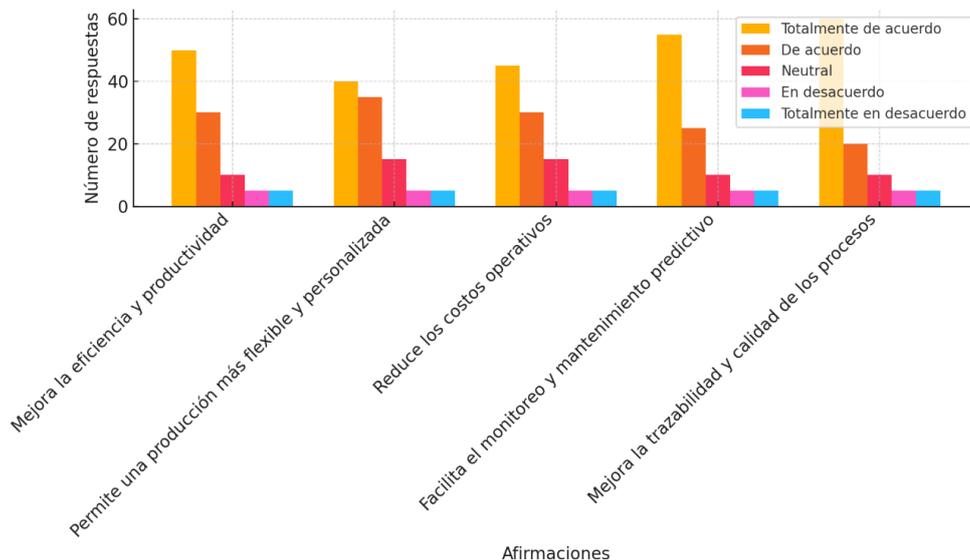


Figura 3. Resultados de la pregunta 3 de la encuesta.

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.

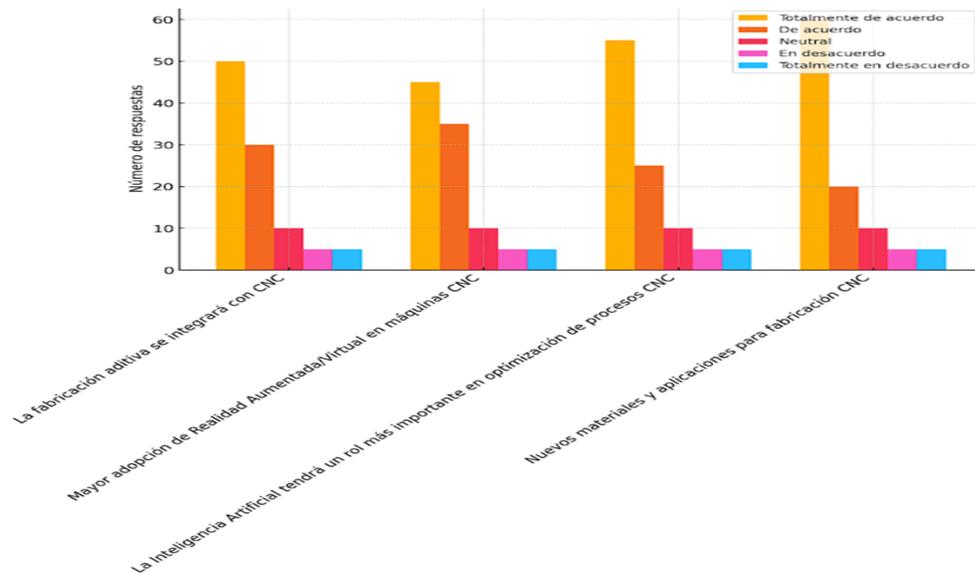


Figura 4. Resultados de la pregunta 6 de la encuesta.

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

El análisis bibliométrico reveló un aumento trascendental en las publicaciones relacionadas con CNC e Industria 4.0 entre 2015 y 2023, con un pico en 2021. Este incremento no solo reflejó un creciente interés académico, sino que también sugirió una maduración de estas tecnologías y su creciente aplicación práctica. La concentración de publicaciones en países como China, Alemania y Estados Unidos indicó que estas naciones lideraron la investigación en este campo, posiblemente debido a sus robustas industrias manufactureras y significativas inversiones en I+D.

La mejora en eficiencia y productividad, respaldada por el 80 % de los encuestados, no fue simplemente un incremento cuantitativo en la producción. Más bien, representó un cambio cualitativo en cómo se conceptualizó y ejecutó el proceso de fabricación. Yao *et al.* [[3]] argumentaron que la integración de CNC con tecnologías como IoT y sistemas ciberfísicos permitió un control y monitoreo en tiempo real de los procesos de producción. Este nivel de integración facilitó la optimización continua de los procesos, lo que explicó la mejora en la eficiencia observada.

La flexibilidad y personalización mejoradas, apoyadas por el 75 % de los encuestados, reflejaron un cambio fundamental en la estrategia de producción. Mantravadi y Møller [[9]] sugirieron que este cambio fue impulsado por la necesidad de adaptar rápidamente la producción a las demandas cambiantes del mercado. La integración de CNC con tecnologías de la Industria 4.0 permitió una reconfiguración rápida de los sistemas de producción, lo que anteriormente habría requerido cambios significativos en el hardware y software.

La reducción de costos operativos, señalada por el 75 % de los encuestados, fue más allá de la simple automatización. Se trató de una optimización holística del proceso de

fabricación. Krogshave *et al.* [[13]] demostraron que la integración de CNC con sistemas de control y optimización del consumo de energía permitió reducir el desperdicio de materiales y minimizar el impacto ambiental de las operaciones de mecanizado. Además, la capacidad de realizar mantenimiento predictivo, respaldada por el 80 % de los encuestados, no solo redujo los costos de mantenimiento, sino que también minimizó el tiempo de inactividad no planificado, un factor crítico en la eficiencia operativa.

La mejora en la trazabilidad y calidad de los procesos, valorada positivamente por el 80 % de los encuestados, reflejó un cambio hacia un enfoque de calidad basado en datos. Pivoto *et al.* [[4]] argumentaron que la integración de CNC con sistemas de IoT y análisis de Big Data permitió un monitoreo continuo y detallado de cada etapa del proceso de producción. Esto no solo facilitó la detección temprana de problemas de calidad, sino que también permitió una mejora continua basada en análisis de datos históricos y en tiempo real.

La resistencia al cambio, identificada como un desafío significativo por el 75 % de los encuestados, no fue simplemente una cuestión de preferencias individuales. Aceto *et al.* [[5]] sugirieron que se refleja la complejidad de cambiar sistemas y procesos profundamente arraigados en las organizaciones manufactureras. Este desafío se vio exacerbado por la rapidez con la que evolucionaron las tecnologías de la Industria 4.0, lo que pudo crear una sensación de incertidumbre y ansiedad entre los trabajadores.

La falta de visión estratégica, señalada por el 75 % de los encuestados, subrayó la necesidad de un liderazgo que no solo comprendiera las tecnologías involucradas, sino que también pudiera visualizar cómo estas tecnologías podían transformar fundamentalmente los modelos de negocio y las propuestas de valor de la empresa. Murat Çınar *et al.* [[6]] argumentaron que este desafío se relacionó con la necesidad de desarrollar nuevas competencias a nivel de liderazgo, que combinaran conocimientos técnicos con habilidades de gestión estratégica.

Las limitaciones presupuestarias, mencionadas por el 80 %

de los encuestados, reflejaron no solo la magnitud de la inversión requerida, sino también la dificultad de cuantificar el retorno de la inversión en tecnologías emergentes. Zonta *et al.* [[7]] señalaron que este desafío se vio agravado por la rápida evolución de las tecnologías, lo que pudo generar preocupaciones sobre la obsolescencia de las inversiones.

En cuanto a las tendencias futuras, la expectativa de una mayor integración de la fabricación aditiva con CNC, respaldada por el 80% de los encuestados, sugirió un futuro donde los límites entre la fabricación sustractiva y aditiva se difuminarían. Jiménez *et al.* [[10]] argumentaron que esta convergencia tenía el potencial de revolucionar el diseño y la producción de productos, permitiendo geometrías y funcionalidades que antes eran imposibles o prohibitivamente costosas.

La creciente adopción de realidad aumentada y virtual en sistemas CNC, anticipada por el 80% de los encuestados, prometió transformar la interacción humano-máquina en entornos de fabricación. Reljić *et al.* [[11]] sugirieron que, más allá de simplemente mejorar la visualización, estas tecnologías tenían el potencial de cambiar fundamentalmente cómo se diseñaban, probaban y optimizaban los procesos de fabricación.

El papel creciente de la inteligencia artificial en la optimización de procesos CNC, previsto por el 80% de los encuestados, sugirió un futuro donde los sistemas de fabricación no solo ejecutarían instrucciones, sino que también tomarían decisiones autónomas basadas en análisis de datos en tiempo real. Nasir y Sassani [[12]] argumentaron que esto tenía implicaciones profundas no solo para la eficiencia y calidad de la producción, sino también para la naturaleza del trabajo en entornos de fabricación.

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 [[19]].

4. Conclusiones

La literatura revisada evidencia una creciente integración entre la tecnología CNC y los conceptos de la Industria 4.0. Esta sinergia emerge como un tema central en la investigación reciente, reflejando la importancia de esta convergencia tecnológica en la evolución de la manufactura moderna. Los estudios analizados convergen en señalar múltiples beneficios de esta integración. Se destaca recurrentemente la mejora en eficiencia, flexibilidad y calidad de los procesos de producción. La literatura también enfatiza el potencial de esta integración para facilitar la personalización masiva y la optimización de recursos. La revisión revela que los desafíos para la implementación de estas tecnologías son un tema frecuente en la literatura. Los obstáculos más citados incluyen la resistencia al cambio organizacional, la falta de visión estratégica y las limitaciones presupuestarias, especialmente en pequeñas y medianas empresas. Se identifica una tendencia creciente en la investigación hacia temas como la integración de CNC con fabricación aditiva, la aplicación de realidad aumentada y virtual en entornos CNC, y el uso de inteligencia artificial

para la optimización de procesos CNC. Estos temas emergen como áreas prometedoras para futuras investigaciones.

La literatura revisada subraya que la adopción exitosa de la integración CNC-Industria 4.0 requiere un enfoque holístico. Los estudios enfatizan la necesidad de considerar no solo los aspectos tecnológicos, sino también los organizacionales y estratégicos. Se observa una brecha en la literatura respecto a estudios longitudinales que evalúen el impacto a largo plazo de estas tecnologías en la productividad y competitividad de las empresas manufactureras. Esta área se presenta como una oportunidad para futuras investigaciones. La revisión destaca la necesidad de más investigación sobre las implicaciones de estas tecnologías en la fuerza laboral, incluyendo las nuevas habilidades requeridas y los cambios en la naturaleza del trabajo en entornos de fabricación avanzada. La literatura analizada sugiere que la integración de CNC con la Industria 4.0 tiene el potencial de contribuir significativamente a la sostenibilidad en la manufactura, aunque se requiere más investigación para cuantificar y optimizar estos beneficios.

Financiamiento:

Los autores expresan que no ha sido necesario financiamiento para realizar esta obra de investigación

Conflicto de intereses:

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

Contribución de autor/es:

Se confirma participación del 33,34% para el primer autor; 33,33% para cada uno de los dos coautores en los diferentes roles de la Taxonomía CRedIT

5. Referencias

1. PARASHAR, B., SHARMA, R., RANA, G. Y BALAJI, R. D. Foundation Concepts for Industry 4.0. [Online]. 2023, págs. 51-68. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-20443-2_3.
2. RODRIGUEZ-ALABANDA, O., ROMERO, P. E. Y GUERRERO-VACA, G. 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 Manufacturing* [online]. 2019, vol. 41, págs. 976-983.
3. YAO, X., ZHOU, J., LIN, Y., LI, Y., YU, H. Y LIU, Y. Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond. *Journal of Intelligent Manufacturing* [online]. 2019, vol. 30, n.º 8, págs. 2805-2817.
4. PIVOTO, D. G. S., DE ALMEIDA, L. F. F., DA ROSA RIGHI, R., RODRIGUES, J. J. P. C., LUGLI, A. B. Y ALBERTI, A. M. Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. 2021, vol. 58, págs. 176-192.

5. ACETO, G., PERSICO, V. Y PESCAPÉ, A. A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials* [online]. 2019, vol. 21, n.º 4, págs. 3467-3501.
6. ÇINAR, Z. M., ZEESHAN, Q., KORHAN, O., AHMED, G., AWAIS, M. Y AHMAD, J. A Framework for Industry 4.0 Readiness and Maturity of Smart Manufacturing Enterprises: A Case Study. *Sustainability*. [Online]. 2021, vol. 13, n.º 2, pág. 6659.
7. ZONTA, T., DA COSTA, C. A., DA ROSA RIGHI, R., DE LIMA, M. J., DA TRINDADE, E. S. Y LI, G. P. Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review. *Computers Industrial Engineering*. [Online]. 2020, vol. 150, pág. 106889.
8. MAREŠ, M., HOREJŠ, O. Y HAVLÍK, L. Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece. *Precision Engineering*. [Online]. 2020, vol. 66, págs. 21-30.
9. MANTRAVADI, S. Y MØLLER, C. An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. [Online]. 2019, vol. 30, págs. 588-595.
10. JIMÉNEZ, M., ROMERO, L., DOMÍNGUEZ, I. A., ESPINOSA, M. D. M. Y DOMÍNGUEZ, M. Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*. [Online]. 2019, pág. 9656938.
11. RELJIĆ, V., MILENKOVIĆ, I., DUDIĆ, S., ŠULC, J. Y BAJČI, B. Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment. *Applied Sciences*. [Online]. 2021, vol. 11, n.º 2, pág. 5592.
12. NASIR, V. Y SASSANI, F. A review on deep learning in machining and tool monitoring: methods, opportunities, and challenges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [Online]. 2021, vol. 115, n.º 9, págs. 2683-2709.
13. KROGSHAVE, J. T., BOETTJER, T. Y RAMANUJAN, D. Machine-Specific Energy Estimation Using the Unit Process Life Cycle Inventory (UPLCI) Model. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. [Online]. 2020, vol. 6.
14. JIA, S. ET AL. Multi-Objective Optimization of CNC Turning Process Parameters Considering Transient-Steady State Energy Consumption. *Sustainability*. [Online]. 2021, vol. 13, n.º 24, pág. 13803.
15. LIU, Q. Y HUANG, T. Inverse kinematics of a 5-axis hybrid robot with non-singular tool path generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. [Online]. 2019, vol. 56, págs. 140-148.
16. NGUYEN, D. K., HUANG, H. C. Y FENG, T. C. Prediction of Thermal Deformation and Real-Time Error Compensation of a CNC Milling Machine in Cutting Processes. *Machines*. [Online]. 2023, vol. 11, n.º 2, pág. 248.
17. SERIN, G., SENER, B., OZBAYOGLU, A. M. Y UNVER, H. O. Review of tool condition monitoring in machining and opportunities for deep learning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [Online]. 2020, vol. 109, n.º 3-4, págs. 953-974.
18. KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. *Software Engineering Group Department of Computer Science*. [Online]. 2004.
19. YANG, Y., CHEN, Z., ZHANG, J., WANG, G., ZHANG, R. Y SUO, D. Preparation and Applications of the Cellulose Nanocrystal. *International Journal of Polymer Science*. [Online]. 2019, pág. 1767028.



Artículo de libre acceso bajo los términos de una **Licencia Creative Commons Reconocimiento – NoComercial – CompartirIgual 4.0 Internacional**. Se permite que otros remezcLEN, adapten y construyan a partir de su obra sin fines comerciales, siempre y cuando se otorgue la oportuna autoría y además licencien sus nuevas creaciones bajo los mismos términos.