

Impacto ambiental de los procesos industriales de mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos mediante métodos innovadores: revisión del estado del arte

Environmental impact of industrial machining processes by chip removal with parallel lathes through innovative methods: a state-of-the-art review

- ¹ Luis Stalin López Telenchana  <https://orcid.org/0000-0001-7548-0406>
Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
luis.lopez@unach.edu.ec
- ² Cynthia Magali Estrada Hernández  <https://orcid.org/0009-0000-2618-941X>
Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
cynthia.estrada@unach.edu.ec
- ³ Marcus Damiano Jurado Robayo  <https://orcid.org/0009-0003-5283-4840>
Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
marcus.jurado@unach.edu.ec
- ⁴ Gerardina Rosario Valdez Muñoz  <https://orcid.org/0009-0009-8056-9259>
Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
gerardina.valdez@unach.edu.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 18/12/2023

Revisado: 21/01/2024

Aceptado: 09/02/2024

Publicado: 15/04/2024

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i2.2993>

Cítese:

López Telenchana, L. S., Estrada Hernández, C. M., Jurado Robayo, M. D., & Valdez Muñoz, G. R. (2024). Impacto ambiental de los procesos industriales de mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos mediante métodos innovadores: revisión del estado del arte. *ConcienciaDigital*, 7(2), 126-140. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i2.2993>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia *Creative Commons AttributionNonCommercialNoDerivatives 4.0 International*. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras claves:

mecanizado,
arranque, viruta,
tornos, paralelos,
sostenibilidad,
refrigeración,
criogénica,
pulverización.

Keywords:

machining,
starting, chips,

Resumen

Introducción: El mecanizado de metales por arranque de viruta es la técnica fundamental en la industria manufacturera, siendo el torneado el proceso de mecanizado tradicional más común, donde mediante la aplicación de energía mecánica se elimina material de una pieza. Como toda técnica de fabricación, el mecanizado por arranque de viruta produce distintos desechos o también llamados subproductos como: virutas del metal base, fluido de refrigerante, aceite lubricante, polvo metálico y excesivo uso de energía, estos desechos tienen importantes consecuencias para el medio ambiente, por lo que las metodologías para evaluar la afectación ambiental hacen que estos procesos tradicionales sean sostenibles. **Objetivo:** El presente estudio se propone investigar cómo las innovaciones tecnológicas pueden reducir el impacto ambiental de los procesos industriales de mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos. **Metodología:** La metodología en la estructuración de la presente investigación corresponde a una revisión exhaustiva de la literatura, seleccionando estudios recientes de alto impacto a través de bases de datos académicas reconocidas. **Resultados:** Los hallazgos de este estudio destacan que el mecanizado en seco emerge como una técnica clave para eliminar la necesidad de refrigerantes líquidos, abordando así los desafíos ambientales asociados con su disposición y reduciendo la exposición a sustancias potencialmente dañinas. La micro pulverización (MQL) se identifica como una estrategia efectiva para reducir el uso de lubricantes, minimizando la contaminación y los costos operativos al tiempo que mantiene la eficiencia del mecanizado. Además, el enfriamiento criogénico destaca por su capacidad para mejorar la dureza y resistencia al desgaste de las herramientas de corte. **Conclusiones:** Se concluyó que al integrar tecnologías innovadoras como refrigeración criogénica y la MQL en el sector manufacturero no solo mejora su sostenibilidad ambiental sino también su competitividad económica, representando pasos significativos hacia la reducción de los impactos ambientales adversos de la manufactura.

Abstract

Introduction: Metal machining by chip removal is the fundamental technique in the manufacturing industry, with

lathes, parallels,
sustainability,
cooling,
cryogenics,
spraying.

turning being the most common traditional machining process, where material is removed from a piece through the application of mechanical energy. Like any manufacturing technique, chip removal machining produces different wastes or also called by-products such as: base metal chips, coolant fluid, lubricating oil, metal dust and excessive use of energy, these wastes have important consequences for the environment, so the methodologies to evaluate environmental impact make these traditional processes sustainable. **Objective:** The present study aims to investigate how technological innovations can reduce the environmental impact of industrial machining processes by chip removal with parallel lathes. **Methodology:** The methodology in structuring this research corresponds to an exhaustive review of the literature, selecting recent high-impact studies through recognized academic databases. **Results:** The findings of this study highlight that dry machining is emerging as a key technique to eliminate the need for liquid coolants, thereby addressing the environmental challenges associated with their disposal and reducing exposure to potentially harmful substances. Microspraying (MQL) is identified as an effective strategy to reduce lubricant usage, minimizing contamination and operating costs while maintaining machining efficiency. In addition, cryogenic cooling stands out for its ability to improve the hardness and wear resistance of cutting tools. **Conclusions:** It was concluded that integrating innovative technologies such as cryogenic refrigeration and MQL in the manufacturing sector not only improves its environmental sustainability but also its economic competitiveness, representing significant steps towards reducing the adverse environmental impacts of manufacturing.

Introducción

En la actualidad, existe la necesidad de alcanzar los requisitos de sostenibilidad en todas las actividades económicas, especialmente en el sector industrial. Estos requisitos están relacionados con la triple línea de base de sostenibilidad, que se basa en los aspectos ambientales, sociales y económicos. Los principales requisitos de sostenibilidad pueden

expresarse en la utilización de recursos renovables, la reducción de los impactos ambientales, la mejora de la salud ocupacional y la seguridad personal, y el aumento de la calidad de vida (Salem et al., 2021).

Los procesos de mecanizado sostenibles se caracterizan por el empleo de recursos de forma eficientes, considerando tres aspectos fundamentales, los económicos, los ambientales y los sociales. Siendo el objetivo principal minimizar los efectos nocivos al medio ambiente, sin que esto signifique elevar los costos de producción, que en el sector manufacturero son muy limitados (Hoghoughi et al., 2022).

El sector manufacturero es uno de los sectores más enfocados en aplicar los principios de sostenibilidad debido al enorme uso de recursos naturales y los impactos ambientales perjudiciales. Además, se considera uno de los sectores contribuyentes más efectivos en el desarrollo de la economía internacional, la creación de empleo y la mejora de la vida de las personas (Ishfaq et al., 2021).

Técnicamente, hasta dos tercios del total de la energía consumida en las operaciones de mecanizado no se aprovechan ya que se convierten en calor y el resto lo consumen los ejes de alimentación, accesorios, motores inactivos, controladores y otros elementos electrónicos fijos (Zohra et al., 2023). Las estadísticas de la U.S. Energy Information Administration (2020) muestran que el consumo de energía relacionado con las operaciones de mecanizado representa más del 20% del consumo energético total de la industria manufacturera; por lo que, para obtener beneficios y seguir siendo competitivos, los industriales deben hacer más esfuerzos para adoptar estrategias que puedan ayudar a reducir el consumo de energía (Hu et al., 2019).

Para cumplir con los requisitos de sostenibilidad en la industria del mecanizado, se ha dedicado un esfuerzo significativo al desarrollo de nuevas estrategias de mecanizado que minimicen los impactos ambientales negativos de los procesos de mecanizado. Estas estrategias, como el corte en seco, los métodos de enfriamiento/lubricación que emplean cantidades mínimas de fluidos de corte y el enfriamiento criogénico, se presentan como soluciones potenciales para lograr un entorno de mecanizado sostenible. Por otro lado, se han realizado numerosos intentos para evaluar los niveles de sostenibilidad de los procesos de mecanizado mediante el desarrollo de métricas de sostenibilidad (Krolczyk et al., 2019).

Aunque recientemente han surgido nuevos procesos de fabricación que revolucionan el panorama respecto a la fabricación de piezas, el proceso de mecanizado sigue vivo y actualizado en este contexto, presentándose siempre como un proceso de fabricación con varias variantes y permitiendo una alta precisión dimensional y altos niveles de acabado superficial (Kwon et al., 2020).

Las herramientas de máquina sostenibles ofrecen ahorro energético y minimizan la contaminación ambiental. Mejorar el rendimiento de componentes como husillos y motores contribuye a este ahorro. Aunque inicialmente no se diseñaron con el ahorro de energía en mente, las herramientas de corte pueden optimizarse cambiando su material base o añadiendo recubrimientos especiales, lo cual mejora su eficiencia energética y efectividad sin elevar significativamente los costos (Kwon et al., 2020).

De hecho, el mecanizado tiene numerosos aspectos que constantemente necesitan ser investigados debido a la constante evolución de los materiales a mecanizar, los materiales y la geometría de las herramientas, y la evolución de los recubrimientos normalmente aplicados a las superficies de las herramientas (Kumar et al., 2021). Por ejemplo, la viruta que puede formarse durante los procesos de mecanizado ha sido objeto de varios estudios porque la formación de viruta proporciona información valiosa y útil sobre la manera en que se está llevando a cabo el proceso de mecanizado y puede proporcionar información sobre los problemas relacionados con su eliminación del equipo y el espacio ocupado (Chen et al., 2021).

En este contexto, el proceso de mecanizado por arranque de viruta implica la remoción controlada de material de una pieza de trabajo mediante herramientas de corte, lo que permite la creación de piezas con geometrías complejas y tolerancias ajustadas. El mecanizado por arranque de viruta incluye operaciones como el torneado, fresado, taladrado, y rectificado, cada una adaptada a diferentes necesidades y tipos de material (Alammari et al., 2023).

La relevancia de estos procesos en el sector industrial no puede subestimarse, dado que permiten la producción en masa de componentes con alta precisión, lo que es fundamental para el mantenimiento de altos estándares de calidad y rendimiento en sectores críticos de la economía. Además, la flexibilidad del mecanizado por arranque de viruta facilita la innovación en diseño y manufactura, al permitir la rápida prototipación y adaptación de los componentes a nuevas especificaciones. Sin embargo, esta capacidad para adaptarse y responder a las demandas cambiantes del mercado viene acompañada de desafíos, especialmente en lo que respecta al impacto ambiental de estas operaciones (Gonçalves et al., 2020).

El mecanizado por arranque de viruta, aunque indispensable, es intensivo en recursos y energía, y genera una cantidad significativa de residuos metálicos y químicos. La sostenibilidad de este proceso es una preocupación creciente, impulsando la búsqueda de innovaciones tecnológicas y metodológicas que puedan reducir su huella ambiental sin comprometer la calidad o la eficiencia de la producción (Hassan, 2022).

La adopción de prácticas más sostenibles en el mecanizado no solo es vital para minimizar los efectos negativos en el medio ambiente, sino también para asegurar la viabilidad a

largo plazo del sector industrial frente a regulaciones ambientales más estrictas y una mayor conciencia ecológica de los consumidores. En este contexto, el mecanizado por arranque de viruta se encuentra en una encrucijada, con la oportunidad de liderar el camino hacia una manufactura más responsable y sostenible (Dornfeld, 2019).

Con base en lo expuesto previamente, el presente estudio tiene como objetivo efectuar una revisión del estado del arte, sobre la disminución del impacto ambiental de los procesos industriales de mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos mediante métodos innovadores.

Metodología

El estado del arte representa el nivel más avanzado de conocimiento y desarrollo alcanzado en un arte o técnica específica en un momento dado (Corzo et al., 2022). En este contexto, este estudio adopta un diseño de investigación descriptivo, centrado en la revisión del estado del arte sobre las innovaciones tecnológicas en el mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos y su impacto en la sostenibilidad y eficiencia energética. La modalidad de investigación es no experimental, de nivel exploratorio y documental, dado que se basa en la revisión y análisis de literatura existente, incluyendo artículos de revistas científicas, tesis doctorales, patentes y actas de conferencias relevantes en el campo de la ingeniería y sostenibilidad (Vizcaíno et al., 2023).

La búsqueda de literatura relevante se realizó en varias bases de datos académicas reconocidas por su rigor y cobertura en el campo de la ingeniería y la sostenibilidad. Las bases de datos incluidas en este proceso fueron *Scopus*, *Web of Science*, *PubMed*, *IEEE Xplore*, además de actas de conferencias, tesis doctorales y registros de patentes. Esta diversidad de fuentes aseguró una cobertura amplia y profunda del conocimiento actual en el área de estudio.

Para garantizar la precisión y exhaustividad de la búsqueda, se emplearon varias combinaciones de palabras clave relevantes al tema de estudio. Las palabras clave incluyeron "mecanizado por arranque de viruta", "tornos paralelos", "impacto ambiental", "innovación en mecanizado" y "sostenibilidad en procesos industriales". Para la selección de literatura, se establecieron los siguientes criterios de inclusión:

- **Publicaciones Recientes:** Se consideraron estudios publicados en los últimos 5 años para asegurar la relevancia y actualidad de la información.
- **Alto Impacto y Métodos Innovadores:** Se dio prioridad a artículos en revistas de alto impacto y estudios que presentaran métodos innovadores para la reducción del impacto ambiental en el mecanizado, reflejando avances significativos en el campo.

Una vez seleccionados los estudios mediante un riguroso proceso de revisión basado en los criterios establecidos, se procedió al análisis detallado de los resultados. Esta fase implicó una evaluación exhaustiva de las innovaciones tecnológicas en el mecanizado por arranque de viruta y su impacto en la sostenibilidad de los procesos industriales, especialmente en el uso de tornos paralelos. Se puso especial énfasis en identificar cómo estas innovaciones contribuyen a la reducción del impacto ambiental, a través de la mejora de la eficiencia energética, la minimización del uso de refrigerantes y la optimización de los procesos de mecanizado para prolongar la vida útil de las herramientas y reducir los residuos.

En cuanto a los aspectos éticos, este estudio respeta las normativas y directrices éticas internacionales para la revisión de literatura, sin embargo, debido a la naturaleza de la investigación, no se requiere solicitar autorización a instituciones y consejos científicos.

Resultados

La operación de mecanizado se define como un proceso de remoción de material que implica la formación de virutas, abarcando diversas morfologías de éstas, tales como virutas continuas, virutas continuas con borde acumulado, virutas discontinuas y virutas serradas. A medida que se incrementa la velocidad de corte, el tipo de viruta experimenta variaciones, tendiendo hacia la forma serrada debido a la distribución desigual de la deformación y el calor en la zona de cizallamiento. Las virutas serradas son particularmente problemáticas, ya que son una fuente principal de fuerzas de corte cíclicas elevadas, desgaste intensivo en el cráter de la herramienta, lo que reduce significativamente su vida útil, produce acabados superficiales de baja calidad y genera vibraciones (Chen et al., 2021).

El mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos es un proceso de fabricación utilizado en la industria mecánica para dar forma a piezas mediante la eliminación de material. Este proceso se realiza en una máquina herramienta llamada torno, específicamente en los modelos conocidos como tornos paralelos debido a la disposición paralela del eje principal de la máquina respecto a la bancada sobre la que se monta (Patel & Chauhan, 2021). Por otro lado, las máquinas paralelas en un entorno de producción se pueden dividir en tres categorías según la naturaleza de la máquina: máquinas paralelas idénticas, uniformes y no relacionadas (Lun & Liao, 2020).

Existen diversas técnicas y enfoques para operaciones de mecanizado sostenibles, dado que, muchos investigadores han encontrado reemplazos, beneficiando la salud de los trabajadores, minimizando los costos de mecanizado y reduciendo el impacto en el medio ambiente, entre los principales se destacan (Wang et al., 2023):

- **Mecanizado en Seco:** La ausencia de fluidos de corte en el mecanizado se denomina mecanizado en seco, ganando prominencia en el mundo manufacturero por su amabilidad ambiental, satisfacción del trabajador, disminución del costo de refrigerante y reducción del flujo de fugas. Un experimento realizado en hierro grafito compactado para 3150 agujeros mediante el proceso de taladrado ha demostrado la viabilidad del mecanizado en seco, aunque presenta desafíos como dimensiones imprecisas de la pieza de trabajo y reducción en la vida útil de la herramienta debido a altas temperaturas en el área de mecanizado.
- **Lubricación en Cantidad Mínima (MQL):** se define como la mezcla de aire comprimido y una pequeña cantidad de aceite en forma de gotas finas pulverizadas sobre la zona de corte. La maquinabilidad de Inconel mejora bajo MQL en comparación con el mecanizado en seco o húmedo, siendo MQL y el recubrimiento de herramientas factores esenciales para la manufactura verde y el mecanizado de alta velocidad.
- **Enfriamiento Criogénico:** es ventajoso y sostenible en términos de protección, limpieza y amabilidad ambiental. Incluye enfoques como preenfriamiento criogénico de la pieza de trabajo, enfriamiento de virutas, enfriamiento criogénico indirecto y enfriamiento criogénico de la herramienta. Aumenta la productividad, prolonga la vida útil de la herramienta y mejora la calidad superficial sin deteriorar sus propiedades mecánicas o químicas, siendo más efectivo que los métodos tradicionales de lubricación y enfriamiento.
- **Técnica de Enfriamiento de Niebla:** El enfriamiento de niebla implica la dispersión de un líquido refrigerante desde una boquilla presurizada en gotas diminutas sobre la superficie enfriada, favorecido cuando se evita el enfriamiento por inundación en el mecanizado, resultando más eficiente que el enfriamiento por inundación con un menor impacto ambiental.
- **Enfriamiento de Alta Presión (HPC):** se utilizan para cortar materiales duros, disminuyendo el desgaste de herramientas y costos de producción. Penetra profundamente en el proceso de corte y tiene un efecto de enfriamiento más significativo que los métodos tradicionales, reduciendo la fricción y aumentando la vida útil de la herramienta.
- **Tecnología de Enfriamiento/Lubricación Híbrida:** Se han realizado intentos para incorporar dos o tres soluciones de refrigerante para mejorar los efectos de los métodos de enfriamiento/lubricación en operaciones de mecanizado, como la combinación de técnicas criogénicas y MQL para mejorar la aspereza superficial y la vida útil de la herramienta.

Por otro lado para Chandell et al. (2021), entre las principales innovaciones tecnológicas relacionadas con el sistema de mecanizado por arranque de viruta se tiene:

Tabla 1

Principales innovaciones tecnológicas relacionadas con el sistema de mecanizado

Técnica utilizada	Resultado de la investigación
Mecanizado en seco y enfriamiento criogénico	Se presentan experimentos en aleación de Mg AZ31 B con mecanizado en seco y enfriamiento criogénico. El mecanizado criogénico aumentará la integridad superficial de la pieza de trabajo mientras también mejora la eficiencia del mecanizado.
Mecanizado en seco, refrigerante inundado y enfriamiento criogénico	Se realizaron experimentos en Ti-6Al-7Nb en varios entornos de enfriamiento, incluyendo mecanizado en seco, refrigerante inundado y enfriamiento criogénico. Se reveló que la fuerza de corte y la fuerza de empuje se redujeron en un 30% cuando se mecanizó con MQL, inundado.
Enfriamiento criogénico	Se llevó a cabo el experimento en una pieza de trabajo de acero AISI 4340 utilizando una técnica de mecanizado de enfriamiento criogénico. Se observó que el error de Ra es solo del 5.32%.
Mecanizado en seco y enfriamiento criogénico	El trabajo de investigación se realizó en acero inoxidable dúplex 2205 bajo condiciones de mecanizado en seco y enfriamiento criogénico. Como resultado, la temperatura de corte se redujo y la potencia de corte fue del 53–58%, en contraste con el mecanizado en seco, la rugosidad mejoró en un 18–23%.
Mecanizado en atmósfera seca y enfriamiento criogénico	En este artículo, se utilizó mecanizado en atmósfera seca y entorno de enfriamiento criogénico en una pieza de trabajo de acero AISI 52,100. Se descubrió que el mecanizado criogénico produjo los mejores resultados.
Enfriamiento criogénico	Se realizaron experimentos en Ti-6Al-4 V en entornos tratados y no tratados (24H, 48H). Como resultado, 24H, 48H produce los mejores efectos y reduce las vibraciones en comparación con los no tratados.
Mecanizado en seco, MQL puro, LN2, Nmql, cryMQL y cry-Nmql	Este artículo discute el mecanizado de Inconel 625 en varios entornos de enfriamiento, incluidos mecanizado en seco, MQL puro, LN2, Nmql, cry-MQL y cry-Nmql. Se descubrió que usar un sistema de enfriamiento de 0.5 vol% hbn con LN2 proporcionó los mejores resultados en eficiencia de mecanizado, como vida útil de la herramienta, Ra.
MQL	Experimentos en Ti-6Al-4 V bajo enfriamiento por inundación, CO2 supercrítico y CO2 supercrítico con MQL se discuten en este artículo. Esta investigación reveló que ScCO2 + MQL mejoró la vida útil de la herramienta en un 163% en V-60, f-0.5 mm/diente.
Mecanizado en seco (no tratado) y enfriamiento criogénico	El estudio en Ti-6Al-4 V bajo varios entornos de enfriamiento, como mecanizado en seco (no tratado) y condiciones tratadas criogénicamente, fue presentado (12H, 24H, y 36H). Se reveló que el tratamiento criogénico profundo hasta 36 h es el más fiable y reduce el desgaste de la herramienta en lugar de otros métodos.

Fuente: Chandel et al. (2021)

La revisión del estado del arte en tecnologías de mecanizado por arranque de viruta revela una clara orientación hacia la mejora de la sostenibilidad y eficiencia en los procesos de manufactura. Los estudios analizados, incluidos aquellos realizados por Chandel et al. (2021), así como investigaciones de otros autores como Salem et al. (2021), Ishfaq et al. (2021) y Krolczyk et al. (2019), convergen en la identificación de estrategias innovadoras como el mecanizado en seco, la lubricación en cantidad mínima (MQL), y el enfriamiento criogénico, que se presentan no solo como soluciones potenciales para minimizar el impacto ambiental sino también para optimizar el consumo energético y prolongar la vida

útil de las herramientas. Estas técnicas, al reducir la dependencia de refrigerantes y lubricantes tradicionales, abordan de manera directa los retos impuestos por la necesidad de prácticas más ecológicas en la industria manufacturera.

En este sentido, a continuación, se describe como las tecnologías mencionadas pueden ser utilizadas en el mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos, para mejorar la sostenibilidad:

- **Mecanizado en Seco:** Al eliminar el uso de refrigerantes líquidos, el mecanizado en seco reduce la necesidad de gestionar y disponer de sustancias químicas potencialmente dañinas para el medio ambiente. Esto no solo disminuye la contaminación del agua y del suelo, sino que también reduce la exposición de los trabajadores a estos químicos. Además, al evitar el uso de refrigerantes, las empresas pueden ahorrar en costos de compra, almacenamiento y tratamiento de estos fluidos, promoviendo así una manufactura más limpia y sostenible.
- **Enfriamiento Criogénico:** Utilizar gases a bajas temperaturas para enfriar la zona de corte minimiza la necesidad de refrigerantes basados en aceite, contribuyendo a una menor contaminación ambiental. Además, el enfriamiento criogénico mejora la eficiencia del proceso de mecanizado, lo que se traduce en una menor generación de residuos y una reducción en el consumo de energía. Al prolongar la vida útil de las herramientas de corte, esta tecnología también disminuye la necesidad de reemplazos frecuentes, reduciendo así los residuos de metales y el consumo de recursos.
- **Refrigerante Inundado y MQL (*Minimum Quantity Lubrication*):** La tecnología MQL, que utiliza solo una mínima cantidad de lubricante, reduce drásticamente la cantidad de residuos líquidos generados en comparación con los sistemas de refrigeración tradicionales. Esto no solo implica una menor contaminación ambiental sino también una reducción en la dependencia de los lubricantes basados en petróleo, contribuyendo a una manufactura más verde. Por otro lado, los sistemas de refrigerante inundado, cuando se usan de manera controlada, pueden optimizar el uso de fluidos, aumentando la eficiencia mientras se minimiza el desperdicio.
- **Aplicaciones Específicas como LN2, Nmql, cry-MQL y cry-Nmql:** Estos enfoques innovadores combinan los beneficios del enfriamiento criogénico con la eficiencia de la lubricación mínima, ofreciendo una solución altamente sostenible para el mecanizado. Al mejorar significativamente la eficiencia del proceso y reducir el desgaste de las herramientas, estas técnicas disminuyen el consumo general de recursos, incluida la energía necesaria para el mecanizado y la cantidad de materiales consumidos. Además, al limitar el uso

de lubricantes y refrigerantes convencionales, contribuyen a una reducción adicional en la contaminación ambiental.

Sin embargo, se debe tener en cuenta el contexto práctico y económico en el que se aplican estas tecnologías. Dado que, si bien los beneficios ambientales y de eficiencia son claros, la implementación de estas innovaciones enfrenta barreras relacionadas con los costos iniciales, la necesidad de adaptación tecnológica y la formación de personal. Además, el análisis de la viruta en el mecanizado, como lo destacan Chen et al. (2021), proporciona información valiosa sobre la efectividad de estos procesos, sugiriendo que el comportamiento de la viruta puede ser un indicador crítico de la eficiencia del mecanizado y la calidad del acabado superficial. Este aspecto subraya la importancia de considerar no solo los beneficios ambientales y energéticos de las innovaciones tecnológicas sino también su impacto en la calidad de la producción y la operatividad en el entorno industrial.

El alcance de los resultados obtenidos destaca la potencialidad de las innovaciones tecnológicas, como el mecanizado en seco, la lubricación en cantidad mínima (MQL), y el enfriamiento criogénico, para contribuir significativamente a la sostenibilidad y la eficiencia energética en el sector del mecanizado. Estas tecnologías ofrecen vías para reducir la generación de residuos, minimizar el consumo energético y prolongar la vida útil de las herramientas, lo que se alinea con los objetivos de reducir los impactos ambientales y mejorar la salud ocupacional y la seguridad personal. Además, el análisis del comportamiento de la viruta y la evaluación de los métodos de enfriamiento y lubricación ofrecen perspectivas valiosas sobre cómo mejorar los procesos de mecanizado para lograr altos niveles de calidad y precisión dimensional.

Por otro lado, los resultados también vienen acompañados de limitaciones significativas, siendo una de las principales, la variabilidad en la aplicabilidad de estas tecnologías en diferentes contextos industriales. Por ejemplo, el costo y la complejidad de implementación de sistemas de enfriamiento criogénico pueden no ser viables para pequeñas y medianas empresas debido a limitaciones de capital y experiencia técnica. Otro aspecto limitante es la disponibilidad de datos comparativos a largo plazo que evalúen el impacto real de estas tecnologías en la sostenibilidad global de los procesos de manufactura. La mayoría de los estudios se centran en resultados a corto plazo o en condiciones de laboratorio, lo que puede no reflejar completamente los desafíos y beneficios en un entorno de producción real.

Conclusiones

- Se puede concluir que los hallazgos del presente estudio profundizan en cómo la implementación de técnicas como el mecanizado en seco, la lubricación en cantidad mínima (MQL) y el enfriamiento criogénico no solo atienden a los

imperativos ambientales actuales, sino que también ofrecen una ruta hacia la optimización de los recursos y la eficiencia energética en los procesos de manufactura, sin que esto signifique aumentar de forma excesiva los costos de los procesos de mecanizado.

- Se puede establecer que a través de la evaluación de estas tecnologías es posible alcanzar un equilibrio entre la producción eficiente y la responsabilidad ambiental, lo cual constituye un aporte fundamental a la ciencia y a la práctica industrial, pues en este estudio se revela que la adopción de innovaciones no solo es viable sino también beneficiosa desde una perspectiva de sostenibilidad, contribuyendo directamente a la reducción de la huella ecológica del sector manufacturero.
- Se puede concluir que la aplicación de tecnologías innovadoras en procesos de mecanizado con arranque de viruta no solo ofrece soluciones sostenibles y eficientes para los desafíos actuales de la industria manufacturera, sino que también marcan un camino hacia la reducción significativa de la huella ambiental asociada con el mecanizado. La integración de estos hallazgos aporta al avance científico y tecnológico en el campo del mecanizado, proporcionando una base sólida para el desarrollo de prácticas más ecológicas y eficientes en la industria, alineadas con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.
- Finalmente se puede establecer, que, a través de una revisión del estado del arte, la disminución del impacto ambiental de los procesos industriales de mecanizado por arranque de viruta con tornos paralelos mediante métodos innovadores como el mecanizado en seco, la lubricación en cantidad mínima (MQL), y el enfriamiento criogénico, demostrando su efectividad en la minimización de residuos, la reducción del consumo energético y la prolongación de la vida útil de las herramientas de corte.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses en relación con el artículo presentado.

Referencias Bibliográficas

Alammari, Y., Saelzer, J., Berger, S., Iovkov, I., & Biermann, D. (2023). Initial Period of Chip Formation: Observations Towards Enhancing Machining Sustainability. *Manufacturing Driving Circular Economy* pp, 193–201.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-28839-5_22

Chandel, R., Kumar, R., & Kapoor, J. (2021). Sustainability aspects of machining operations: A summary of concepts. *Materials Today. Proceedings*.

doi:10.1016/j.matpr.2021.04.624

- Chen, X., Tang, J., Ding, H., & Liu, A. (2021). A new geometric model of serrated chip formation in high-speed machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 632-645.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612520308896?via%3Dihub>
- Corzo, C., Flores, N., & Román, I. (2022). El estado del arte, ¿Necesidad o necesidad? *Revista de Ciencias Humanas y Sociales*, 39(29), 139-153. doi:1012-1587
- Dornfeld, D. (2019). Sustainability of Machining. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 1204–1207.
https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-20617-7_6702
- Gonçalves, C., Peter, M., Hans, E., & Silva, R. d. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 5(5), 1462–1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
- Hassan, K. (2022). Comparative life cycle analysis of environmental and machining performance under sustainable lubrication techniques. *Hybrid Advances*, 1(100004).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2773207X22000045>
- Hoghoughi, M., Farahnakian, M., & Elhami, S. (2022). Environmental, economic, and machinability-based sustainability assessment in hybrid machining process employing tool textures and solid lubricant, *Sustainable Materials and Technologies*,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993722001257>
- Hu, L., Tang, C., & Feng, M. (2019). Optimization of cutting parameters for improving energy efficiency in machining process. *Robot Comput-Integr Manuf*, 59, 406–416. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.015>
- Ishfaq, K., Anjum, I., Pruncu, C., Amjad, M., Kumar, S., & Asad, M. (2021). Progressing towards Sustainable Machining of Steels: A Detailed Review. *Materials*, 14(18). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8464692/>
- Krolczyk, G., Maruda, R., Krolczyk, J., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., & Budzik, G. (2019). Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production. *A review. J. Clean. Prod.*, 218, 601–615.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619303968>
- Kumar, R., Singh, S., Bilga, P., Jatin, K., Singh, J., Singh, S., & Pruncu, C. (2021). Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective

- optimization in machining operations: A critical review. *J. Mater. Res. Technol.*, 10, 1471-1492. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.114>
- Kwon, S., Nagaraj, A., Yoon, H., & Min, S. (2020). Study of material removal behavior on R-plane of sapphire during ultra-precision machining based on modified slip-fracture model. *Nanotechnol. Precis. Eng.*, 3, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.npe.2020.07.001>
- Lun, C., & Liao, J. (2020). Two Parallel-Machine Scheduling Problems with Function Constraint. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2020/2717095/>
- Patel, H., & Chauhan, I. (2021). A study on Types of Lathe Machine and Operations: Review. *International Journal of Advance Research and Innovation*, 8(4), 286-291. <https://ijari.org/assets/papers/8/4/IJARI-DE-20-12-103.pdf>
- Salem, A., Hega, H., & Kishawy, H. (2021). An integrated approach for sustainable machining processes: Assessment, performance analysis, and optimization. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 450-470. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550920313956>
- U.S. Energy Information Administration. (2020). *Total energy annual data - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.php>.
- Vizcaíno, P., Cedeño, R., & Maldonado, I. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723-9762. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7658
- Wang, L., Cai, W., He, Y., Peng, T., Xie, J., Hu, L., & Li, L. (2023). Equipment-process-strategy integration for sustainable machining: a review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 18(36). <https://link.springer.com/article/10.1007/s11465-023-0752-4>
- Zohra, F., Jabri, A., & Barkany, A. E. (2023). Optimization techniques for energy efficiency in machining processes—a review. *Springer Limk*, 2967–3001. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-10927-y>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Indexaciones

