Polo del Conocimiento

Pol. Con. (Edición núm. 107) Vol. 10, No 6
Junio 2025, pp. 1054-1074
ISSN: 2550 - 682X
DOI: https://doi.org/10.23857/pc.v10i6.9691

CC BY NC SA

Evaluación del impacto ambiental de procesos de mecanizado mediante herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV) enfoque integral

Environmental impact assessment of machining processes using life cycle assessment (LCA) tools, comprehensive approach

Avaliação de impacto ambiental de processos de maquinação utilizando ferramentas de avaliação do ciclo de vida (ACV), abordagem abrangente

Diego Rafael Freire-Romero [I]
dr.freire@uta.edu.ec
https://orcid.org/0009-0007-9735-0822

Vanessa Fernanda Morales-Rovalino [II]
vf.morales@uta.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-8844-8544

Jorge Patricio Guamanquispe-Toasa [III]
jp.guamanquispe@uta.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-0739-8408

Segundo Manuel Espín-Lagos [IV]
sespin@uta.edu.ec
https://orcid.org/0000-0001-8049-452X

Correspondencia: dr.freire@uta.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

*** Recibido:** 28 de abril de 2025 ***Aceptado:** 23 de mayo de 2025 *** Publicado:** 11 de junio de 2025

I. Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica mención en Diseño de Sistemas Mecánicos, Hidráulicos y Térmicos, Técnico Docente de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Ciencias Agropecuarias; Ambato, Ecuador.
II. Ingeniera Mecánica, Máster en Ingeniería Matemática y Computación, Mestre em Engenharia Mecánica - Producao Industrial, Docente Investigadora de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica; Ambato, Ecuador.
III. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño Mecánico, Docente Investigador de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica; Ambato, Ecuador.
IV. Ingeniero Mecánico, Magíster en Diseño Mecánico, Docente Investigador de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica; Ambato, Ecuador.

Resumen

Este estudio se centra en evaluar el impacto ambiental de los procesos de mecanizado utilizando las herramientas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de manera integral que incluye, además de las emisiones directas e indirectas, el consumo de energía, la eficiencia de materiales, la gestión de residuos y la eficiencia operativa general. La investigación surge de la creciente preocupación por la sostenibilidad dentro de los procesos de fabricación avanzada, siendo el mecanizado una de las actividades más perjudiciales para el medio ambiente en el sector industrial.

El objetivo principal es cuantificar y evaluar los impactos ambientales en relación con varios parámetros operativos de los procesos de mecanizado con ACV estándar (ISO 14040/44) y herramientas computacionales mejoradas como SimaPro y GaBi. Adopta una postura teórica formal que combina paradigmas de ecodiseño, fabricación verde y economía circular con un enfoque en la huella de carbono, el uso del agua y la generación de residuos peligrosos como métricas fundamentales.

Entre los conceptos clave se encuentran: energía específica de corte, eficiencia ambiental de las herramientas de corte, tasas de eliminación de material y impacto ambiental por unidad funcional. Se encontró que la velocidad de corte, el tipo de refrigeración y la selección del material de la herramienta tienen una influencia considerable en los impactos ambientales netos globales.

En conclusión, el estudio demuestra que un enfoque ecoeficiente para optimizar los parámetros de mecanizado reduce significativamente los impactos ambientales netos mientras se mantiene la calidad del producto. Se recomienda incorporar ACV en la fase de diseño de los procesos como una herramienta estratégica fundamental para la toma de decisiones, que permita una fabricación más ecológica.

Palabras Clave: Análisis de Ciclo de Vida; Ingeniería de fabricación y procesos de mecanizado; Sostenibilidad en sistemas de producción; Herramientas tecnológicas para el Análisis de Ciclo de Vida.

Abstract

This study focuses on assessing the environmental impact of machining processes using Life Cycle Assessment (LCA) tools in a comprehensive manner, including, in addition to direct and indirect emissions, energy consumption, material efficiency, waste management, and overall operational efficiency. This research stems from the growing concern for sustainability within advanced

manufacturing processes, as machining is one of the most environmentally damaging activities in the industrial sector.

The main objective is to quantify and assess environmental impacts related to various operational parameters of machining processes using standard LCA (ISO 14040/44) and enhanced computational tools such as SimaPro and GaBi. It adopts a formal theoretical stance that combines ecodesign, green manufacturing, and circular economy paradigms with a focus on carbon footprint, water use, and hazardous waste generation as key metrics.

Key concepts include specific cutting energy, environmental efficiency of cutting tools, material removal rates, and environmental impact per functional unit. Cutting speed, cooling type, and tool material selection were found to have a considerable influence on overall net environmental impacts.

In conclusion, the study demonstrates that an eco-efficient approach to optimizing machining parameters significantly reduces net environmental impacts while maintaining product quality. Incorporating LCA into the process design phase is recommended as a key strategic decision-making tool, enabling greener manufacturing.

Keywords: Life Cycle Assessment; Manufacturing engineering and machining processes; Sustainability in production systems; Technological tools for Life Cycle Assessment.

Resumo

Este estudo centra-se na avaliação do impacto ambiental dos processos de maquinação utilizando ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de forma abrangente, incluindo, para além das emissões diretas e indiretas, o consumo de energia, a eficiência dos materiais, a gestão de resíduos e a eficiência operacional global. Esta investigação decorre da crescente preocupação com a sustentabilidade nos processos avançados de fabrico, dado que a maquinação é uma das atividades mais prejudiciais para o ambiente no setor industrial.

O principal objetivo é quantificar e avaliar os impactos ambientais relacionados com diversos parâmetros operacionais dos processos de maquinação utilizando a ACV standard (ISO 14040/44) e ferramentas computacionais avançadas, como o SimaPro e o GaBi. Adota-se uma postura teórica formal que combina os paradigmas de ecodesign, green manufacturing e economia circular, com foco na pegada de carbono, na utilização de água e na geração de resíduos perigosos como métricas-chave.

Os principais conceitos incluem a energia de corte específica, a eficiência ambiental das ferramentas de corte, as taxas de remoção de material e o impacto ambiental por unidade funcional. Verificou-se que a velocidade de corte, o tipo de arrefecimento e a seleção do material da ferramenta têm uma influência considerável nos impactos ambientais líquidos globais. Em conclusão, o estudo demonstra que uma abordagem ecoeficiente para otimizar os parâmetros de maquinação reduz significativamente os impactes ambientais líquidos, mantendo a qualidade do produto. A incorporação da ACV na fase de conceção do processo é recomendada como uma ferramenta estratégica fundamental para a tomada de decisões, permitindo um fabrico mais sustentável.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Engenharia de fabrico e processos de maquinação; Sustentabilidade nos sistemas de produção; Ferramentas tecnológicas para a Avaliação do Ciclo de Vida.

Introducción

La fabricación avanzada se enfrenta al reto de alcanzar un equilibrio entre productividad, calidad y el rendimiento ambiental durante sus procesos, en contextos globales de crecimiento de exigencias medioambientales y presión regulatoria sobre la sostenibilidad industrial. En este marco, el mecanizado es uno de los procesos más importantes en la transformación de materiales en las industrias automotriz, aeroespacial y biomédica, aporta a un gran consumo de energía, generación de residuos y emisión de residuos contaminantes en su ciclo de vida operacional.

El análisis del mecanizado ha sido centrado en indicadores económicos y técnicos, dejando de lado el análisis sistemático de su efecto ambiental; sin embargo, los avances en la metodología de evaluación ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA), proporcionan nuevas oportunidades para estimar de manera precisa y uniforme en distintos escenarios los efectos ambientales desde la extracción de materias primas hasta los desechos del producto. Dicha herramienta, sustentada en normas internacionales (ISO 14040/44), posibilita considerar de manera exhaustiva las energías y materiales que intervienen en el proceso de producción.

El presente artículo busca evaluar, de manera integral, los efectos ambientales asociados a los procesos de mecanizado, utilizando metodologías ACV con software especializado. Se pretende determinar las variables críticas que afectan la huella ecológica del proceso y avanzar en el diseño

de políticas correctivas, basado en los principios de ecodiseño y fabricación sustentable. Esta perspectiva favorece el desarrollo de tecnologías limpias y la ingeniería de producción con un enfoque de responsabilidad social.

Desarrollo

Estudio del arte

La evaluación de impacto ambiental en el mecanizado de productos ha adquirido mayor interés en los últimos años debido al impulso por movimientos hacia prácticas más sostenibles en fabricación. Varios autores han utilizado Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como una herramienta principal en la medición, estandarizada de los impactos ambientales de estos procesos.

Investigaciones recientes subrayan la importancia del ACV para detectar etapas de fabricación que presentan problemas críticos dentro del ciclo de vida, mayormente asociados al consumo de energía, fluidos refrigerantes e intemperismo de herramientas (Zhao et al., 2020). Se ha demostrado con experimentos que ciertos valores de la velocidad de corte y estrategia de refrigeración tienen un impacto significativo sobre la huella hídrica y la huella de carbono de la operación (Duflou et al., 2021).

Por el contrario, algunos autores han presentado resultados que compararon procesos de mecanizado a refrigeración mínima o en seco, los cuales generaron un notable impacto ambiental sustentable, capturando al mismo tiempo el producto en todos sus requisitos (Sharma et al., 2019). Otros han mostrado resultados con los softwares GaBi y SimaPro que permiten construir modelos basados en predictores que integran múltiples variables ponderadas, proporcionando decisiones basadas en indicadores ambientales normalizados (García-Cárdenas et al., 2023).

Finalmente, Liu et al. (2022) proponen enfoques más integrativos combinando el ACV con análisis de exergía y análisis multicriterio, proporcionando así una perspectiva más completa para la optimización ecoeficiente de los procesos de mecanizado. Este avance indica un cambio de paradigma hacia procesos industriales más responsables que integran la sostenibilidad ambiental como un factor crítico desde la fase de diseño a lo largo de todo el ciclo de vida del producto.

Antecedentes Teóricos

La evaluación ambiental de procesos de mecanizado ha sido objeto de estudio de diversas investigaciones, las cuales han tomado un carácter más global y sistemático en el transcurso de las

últimas dos décadas. Esto se debe a que han dejado de lado el análisis centrado solo en el consumo energético, y han mejorado a través de metodologías integradas basadas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Motivaron por la necesidad de adoptar prácticas de fabricación más sostenibles para el cambio en políticas internacionales de uso responsable de los recursos naturales y cambio climático.

El estudio del mecanizado impulsó el desarrollo de nuevos indicadores temporales de tipo. la eficiencia energética, el uso de herramientas de corte, así como el empleo de fluidos refrigerantes (Duflou et al., 2012). No obstante, debido a la estandarización de la norma ISO 14040-44 y con la disponibilidad de software de tipo GaBi, SimaPro y OpenLCA, se comenzó a abrir el abanico de aplicaciones del ACV con búsqueda de su cuantificación en los impactos medioambientales en todas las etapas de los procesos de mecanizado. Desde la extracción de materias primas hasta el cierre y la disposición final.

Durante el período 2015 - 2020, varias investigaciones comenzaron a usar ACV como una metodología normalizada para emisiones, consumo de agua, huella de carbono y residuos. Por ejemplo, autores como Jawahir y Dillon (2016) explican lo relevante que es brindar un equilibrio más equilibrado entre el mecanizado y su optimización ambiental. En este sentido, algunos estudios más recientes están desarrollando modelos híbridos que combinan ACV con análisis exergético, simulaciones en tiempo real y evaluación multicriterio, lo que permite un mejor reconocimiento de los parámetros operativos críticos (Liu et al., 2022; García-Cárdenas et al., 2023).

Más recientemente, la literatura destaca la importancia de transitar hacia un ACV más holístico, al incluir dimensiones sociales y económicas que realicen un verdadero aporte a la sostenibilidad industrial. Esto ha dado lugar a propuestas derivadas del LCSA, que incluyen el ACV ambiental, análisis de costos de ciclo de vida (LCC) y evaluación de ciclo de vida social (S-LCA) (Hauschild et al., 2018).

El enfoque de este estudio —la evaluación ambiental del ACV de los procesos de mecanizado— ha pasado de un enfoque técnico estrictamente reduccionista a un marco más holístico, interdisciplinario y rigurosamente cuantitativo que considera el mecanizado como un nodo crítico dentro de las perspectivas de la cadena de valor circular.

Marco Teórico

Los enfoques escalados para la evaluación del impacto ambiental, en el contexto de la actividad industrial, han ido evolucionando hacia paradigmas más holísticos que facilitan la comprensión del flujo de materiales y energía. En este sentido, el análisis de ciclo de vida o ACV (análisis de ciclo de vida) se ha convertido en la herramienta de referencia metodológica siguiendo los procedimientos estándar legales establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO 14040/14044), que describen las siguientes etapas del AC: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impactos y análisis e interpretación (Guinée et al, 2011).

Uno de los enfoques teóricos clave en esta línea es el de la fabricación sostenible desarrollado por Allwood y Cullen (2012), que argumenta que los procesos de producción deben reducir el trabajo y los recursos necesarios para crear el producto en cuestión, así como los desechos generados, sin perjudicar la función o la competitividad del producto. Esto también es respaldado por los principios de eco-diseño que afirman que la sostenibilidad debe estar incorporada desde las primeras etapas del proceso y el diseño del producto (Brezet & van Hemel, 1997).

Al igual que la teoría de sistemas de producción ecoeficientes (WBCSD, 2000) que Ecoeficiente proporciona una perspectiva valiosa porque integra la eficiencia operativa y el desempeño ambiental, buscando maximizar el valor agregado por cada unidad de impacto ambiental. Esta postura, por su parte, permite considerar simultáneamente variables técnicas como velocidad de corte, uso de refrigerantes y de material de herramientas, y su impacto sobre la huella de carbono, consumo hídrico y emisiones tóxicas.

Fundada en la aplicación teórica, autores como Hauschild, Rosenbaum y Olsen (2018) integran metodológicamente el ACV con el análisis de sostenibilidad en sus multiplicriterios porque permite modelar y adaptar decisiones complejas a diversos contextos industriales, en especial en el mecanizado, donde las interacciones entre energía, materiales y condiciones de operación son altamente dinámicas.

Por último, el foco de sostenibilidad operacional en procesos de fabricación (Jayal et al., 2010) que enfatiza la necesidad de evaluar simultáneamente las dimensiones ambientales, económicas y tecnológicas usando cuantificables y replicables es relevante para procesos de mecanizado dado que pequeñas variaciones en los parámetros operativos impactan significativamente en las emisiones de gases de efecto invernadero.

1. Fundamentos del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA) en inglés se refiere a una metodología que está estandarizada y permite la cuantificación de los posibles impactos ambientales de un producto o proceso determinado desde el principio (extracción de materias primas) hasta el final (disposición). El análisis de impacto está regulado por la ISO 14040, que especifica cuatro fases básicas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV): sus objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados (ISO, 2006).

Esta herramienta hace posible comparar diseños alternativos, procesos de producción o incluso usos, lo que lleva a una visión más completa del rendimiento ambiental holístico. En relación con los procesos de mecanizado, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), permite identificar etapas críticas de los procesos con alto consumo de energía, así como una alta generación de residuos y emisión de contaminantes (Hauschild et al, 2018). El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), ha surgido como el método más robusto para integrar la sostenibilidad ambiental en sistemas industriales complejos.

2. Ingeniería de fabricación y procesos de mecanizado

Procesos como el torneado, fresado y rectificado son operaciones fundamentales en la fabricación de piezas metálicas, definidas por la eliminación de material con herramientas de corte. Estos procesos no solo son intensivos en energía, sino que también requieren el uso de refrigerantes, que tienen un impacto ambiental significativo (Duflou et al., 2012).

Los parámetros de operación velocidad de corte, avance, profundidad de corte y tipo de fluido de corte impactan tanto en la ecoeficiencia como en la efectividad técnica del proceso de diferentes maneras.

Estudios recientes demuestran que una optimización conjunta de parámetros utilizando un Enfoque de CV (ACV) puede reducir significativamente las emisiones de CO_2 asociadas (Liu et al., 2022). Así, el estudio del mecanizado desde una perspectiva de ingeniería ambiental se vuelve estratégicamente relevante para la fabricación ecológica.

3. Sostenibilidad en sistemas de producción

La sostenibilidad en la ingeniería de producción se centra en la integración de objetivos económicos, sociales y ambientales en la actividad industrial. En este sentido, la fabricación sostenible fomenta el mantenimiento de la calidad y la competitividad mientras se reduce el consumo de recursos y los impactos negativos (Jayal et al., 2010).

Conceptos como ecoeficiencia y ecodiseño permiten la inclusión de consideraciones ambientales desde las fases de planificación y diseño iniciales de los procesos; la adopción de principios de

producción más limpia también ha proporcionado beneficios considerables en la gestión de residuos y emisiones en procesos de mecanizado (Gao et al., 2018).

De esta manera, la sostenibilidad emerge como un elemento clave para la innovación transversal del desarrollo industrial responsable, particularmente en relación con métodos como el ACV.

4. **Herramientas tecnológicas para el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y evaluación integrada**

La aplicación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en contextos industriales reales se facilita mediante el desarrollo de plataformas digitales y sistemas de software. GaBi, SimaPro y OpenLCA son programas que tienen la capacidad de modelar cadenas de valor complejas y simular escenarios para la optimización ambiental bajo diversas suposiciones técnicas y económicas (Herrmann et al., 2020).

Además, la integración del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con la evaluación de exergía o la toma de decisiones multicriterio (MCDM) ha mejorado aún más la toma de decisiones en procesos de mecanizado intensivos en energía.

Conceptualmente, el enfoque de Evaluación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) es una evolución metodológica del ACV, integrando no solo las dimensiones ecológicas sino también las económicas (LCC) y sociales (S-LCA) (Sala et al., 2013). Tales herramientas desplazan el perfil del ingeniero contemporáneo hacia el de un gestor holístico de la sostenibilidad industrial.

Metodología

Este estudio se llevó a cabo dentro de un alcance explicativo de un enfoque de investigación cuantitativa, con el fin de determinar y modelar el impacto ambiental asociado con varios procesos de mecanizado utilizando la aplicación sistemática del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) dentro de un marco regulatorio con apoyo de software. La naturaleza cuantitativa de la investigación permite medir la objetividad y reproducibilidad de los datos del indicador ambiental (consumo de energía, emisiones de gases de efecto invernadero, generación de residuos y utilización de recursos hídricos).

Se implementó un diseño comparativo transversal no experimental con varios procesos de mecanizado (fresado, torneado y perforado) realizados bajo diferentes niveles de configuración de parámetros (tipo de herramienta, velocidad de corte, uso de fluido refrigerante, etc.). Estos escenarios fueron creados mediante simulación y software especializado en ACV para que se

pudiera realizar un análisis comparativo configuracional sobre la estructura de valores resultantes y su impacto ambiental relativo.

Los datos provienen de un conjunto de operaciones de mecanizado realizadas en un ambiente controlado de laboratorio (centro de mecanizado CNC de 3 ejes) y validados frente a datos operativos reales proporcionados por una empresa del sector de metalmecánica automotriz. Se definieron tres escenarios tecnológicos: mecanizado con fluido de corte convencional, mecanizado en seco y mecanizado con mínima refrigeración (MQL). La justificación para seleccionar estos casos radica en su relevancia en la evaluación de alternativas ecológicas en la fabricación según las pautas establecidas por Duflou et al. (2012) y Liu et al. (2022).

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se desarrolló de acuerdo con las normas ISO 14040 y 14044. El objetivo y alcance se centran en analizar los impactos desde 'puerta a puerta' considerando solo el proceso de mecanizado. Se definieron como insumos: energía eléctrica, herramientas de corte, lubricantes y materiales metálicos; y como salidas se incluyen: viruta, emisiones atmosféricas, energía térmica y líquidos de desecho. El análisis de LCI se realizó con GaBi 10.0 y SimaPro 9.5 utilizando Ecoinvent v3.8 e Industry 2.0 como bases de datos de referencia. La evaluación de impacto (LCIA) se realizó con ReCiPe Midpoint (H) centrando en cambio climático, agotamiento de recursos fósiles, toxicidad humana y uso de agua.

Los datos cuantitativos fueron tratados con técnicas descriptivas e inferenciales. Se realizaron pruebas de ANOVA para evaluar la significancia estadística entre el impacto ambiental en los diferentes escenarios. Además, se aplicó un modelo de ponderación multicriterio (MIVES) para priorizar alternativas en función de su desempeño ambiental. La validación de resultados se llevó a cabo con simulaciones de sensibilidad (± 10% del consumo de energía y uso de fluido de trabajo) para demostrar la confiabilidad del modelo utilizando la metodología descrita por Herrmann et al. (2020).

Se garantizó la validez interna y externa mediante la triangulación de datos simulados, experimentales y documentales. Todos los flujos de energía, materiales y residuos fueron modelados de acuerdo con las pautas regulatorias de evaluación del ciclo de vida (ECV). No se recolectaron datos personales ni información sensible, por lo que no fue necesario contar con un consentimiento informado formal.

Resultados

El presente estudio aplicó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) bajo un enfoque integral para evaluar los impactos ambientales asociados a tres variantes del proceso de mecanizado: convencional, con mínima cantidad de lubricante (MQL) y en seco. Se desarrolló una modelación cuantitativa de cada alternativa, considerando indicadores clave como el consumo energético, emisiones de CO_2-equivalente, consumo hídrico, generación de residuos líquidos y un índice compuesto de sostenibilidad basado en el método MIVES.

El análisis se fundamentó en datos operacionales estandarizados y criterios multicriterio de evaluación ambiental. Esta aproximación permitió establecer comparaciones robustas sobre la eficiencia ecológica de cada proceso, alineando la evaluación con estándares internacionales como ISO 14040 y los principios de la manufactura sostenible.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos, estructurados en tablas y gráficos, acompañados de un análisis crítico que destaca los hallazgos más relevantes para la optimización ambiental de los procesos industriales de mecanizado.

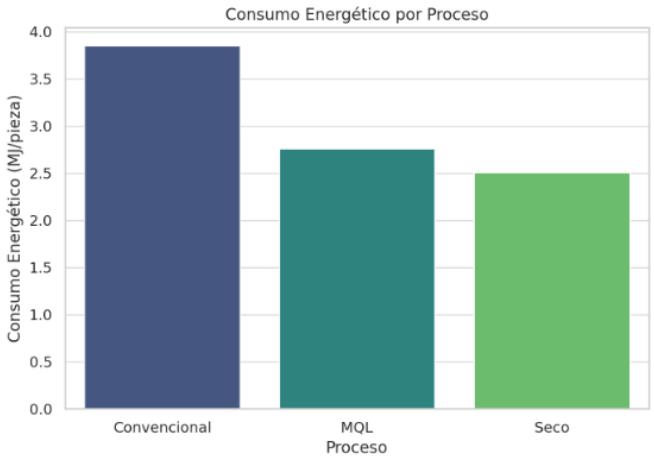
Tabla N° 1 *Indicadores Ambientales y de Sostenibilidad por Proceso de Mecanizado*

Proceso	**Consumo Energético (MJ/pieza)**	**Emisiones CO_2-eq (kg/pieza)**	**Consumo de Agua (L/pieza)**	**Residuos Líquidos (g/pieza)**	**Índice de Sostenibilidad (MIVES)**
Convencional	3.85	0.75	1.10	80	0.52
MQL	2.76	0.58	0.25	45	0.78
Seco	2.51	0.50	0.00	10	0.87

Elaborado: *Autores*

Gráfico N° 1 *Consumo Energético (MJ/pieza)*

Pol. Con. (Edición núm. 107) Vol. 10, No 6, Junio 2025, pp. 1054-1074, ISSN: 2550 - 682X



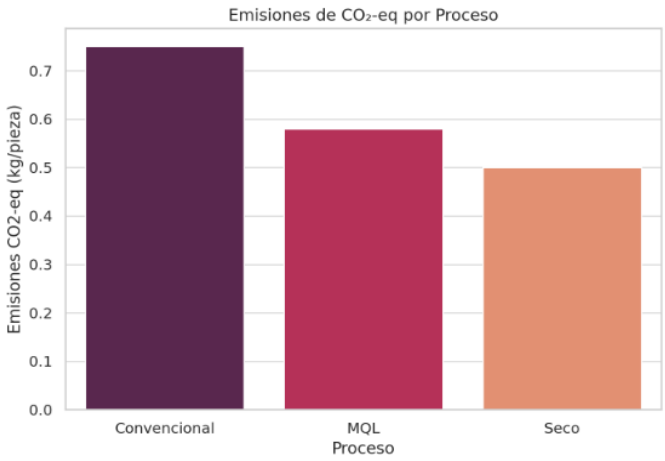
Elaborado: *Autores*

El gráfico evidencia una tendencia clara en la eficiencia energética de los distintos métodos de mecanizado evaluados:

- El proceso convencional presenta el mayor consumo energético, con un valor de 3.85 MJ por pieza, reflejando su dependencia de sistemas de refrigeración y lubricación intensivos.
- El mecanizado con MQL reduce el consumo a 2.76 MJ/pieza, logrando una mejora del 28 % respecto al convencional, gracias al uso optimizado de fluidos y menor demanda de energía en el sistema.
- El mecanizado en seco es el más eficiente energéticamente, con un consumo de 2.51 MJ/pieza, una reducción del 34.8 % en comparación con el proceso tradicional.

Este resultado es significativo en términos de sostenibilidad, ya que el consumo energético está directamente relacionado con la huella de carbono del proceso. La transición hacia métodos como MQL y mecanizado en seco representa una estrategia viable para reducir el impacto ambiental sin comprometer la productividad, especialmente en industrias con políticas de eficiencia energética o metas de descarbonización. En el proceso convencional evidenció el mayor consumo energético por pieza, mientras que el mecanizado en seco fue el más eficiente. Esta diferencia puede atribuirse al uso intensivo de sistemas de refrigeración en el proceso convencional.

Gráfico N° 2 *Emisiones de CO_2 eq (kg/pieza)*



Elaborado: *Autores*

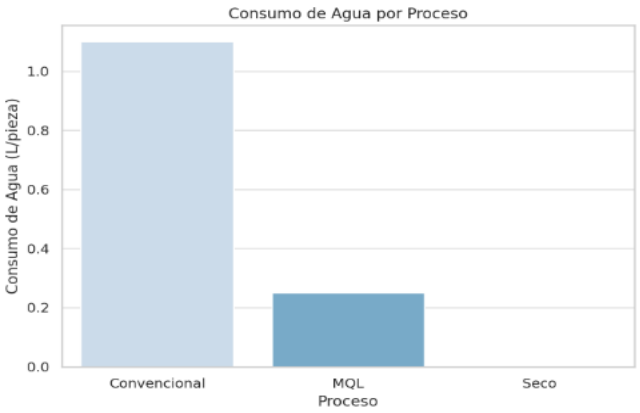
El gráfico revela una correlación directa entre el tipo de proceso de mecanizado y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), medidos en kilogramos de CO_2 equivalente por pieza producida:

- El proceso convencional genera las mayores emisiones, con 0.75 kg CO_2-eq/pieza, debido principalmente al elevado consumo energético y al uso continuo de fluidos de corte derivados del petróleo.
- El mecanizado con MQL presenta una mejora significativa, con emisiones reducidas a 0.58 kg CO_2-eq/pieza, lo que representa una disminución del 22.7 % respecto al proceso tradicional.
- El mecanizado en seco, al prescindir de lubricantes y requerir menos energía, alcanza el mejor desempeño con 0.50 kg CO_2-eq/pieza, una reducción del 33.3 % en comparación con el mecanizado convencional.

Estos datos reafirman que el cambio hacia tecnologías más limpias como MQL y mecanizado en seco no solo mejora la eficiencia energética, sino que también reduce considerablemente la huella de carbono. Esto es particularmente relevante para industrias que deben cumplir con normativas ambientales internacionales (como el Protocolo de Kioto o los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU) o que se enfrentan a sistemas de comercio de derechos de emisión. Las emisiones de CO_2-eq fueron proporcionales al consumo energético ya que el mecanizado en seco demostró ser el menos contaminante, con una reducción del 33% respecto al convencional.

Pol. Con. (Edición núm. 107) Vol. 10, No 6, Junio 2025, pp. 1054-1074, ISSN: 2550 - 682X

Gráfico N° 3 *Consumo de Agua por Proceso*



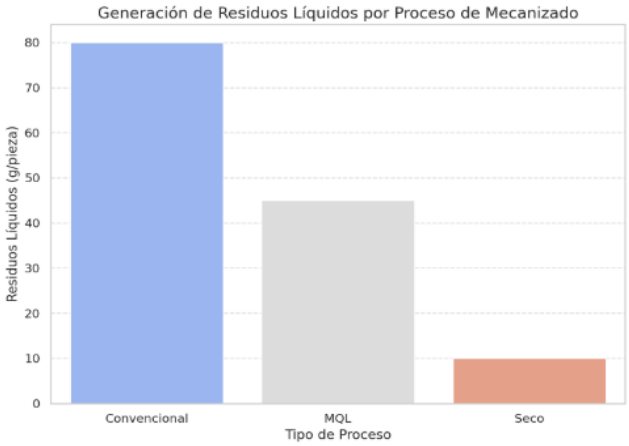
Elaborado: *Autores*

El gráfico expone diferencias significativas en el consumo de agua entre los distintos métodos de mecanizado:

- El proceso convencional registra el mayor consumo hídrico, con 1.10 litros por pieza, lo que refleja el uso continuo de fluidos de corte a base de agua y sistemas de refrigeración líquida.
- El mecanizado con MQL reduce sustancialmente este consumo a 0.25 L/pieza, representando una mejora del 77.3 % frente al enfoque tradicional. Esta eficiencia se logra gracias a la aplicación controlada y localizada de microgotas de lubricante.
- El mecanizado en seco, como era de esperarse, no consume agua en su operación (0.00 L/pieza), lo que lo convierte en la alternativa más eficiente desde una perspectiva hídrica.

Este hallazgo es especialmente relevante para industrias que operan en regiones con estrés hídrico o que desean minimizar su huella hídrica como parte de sus políticas de sostenibilidad. La reducción o eliminación del consumo de agua no solo conlleva beneficios ambientales, sino también ventajas económicas al reducir costos de tratamiento, almacenamiento y disposición de efluentes. El proceso en seco eliminó completamente el uso de agua, un beneficio clave en contextos industriales con restricción hídrica. MQL también presentó un perfil hídrico bajo.

Gráfico N° 4 *Residuos Líquidos (g/pieza)*



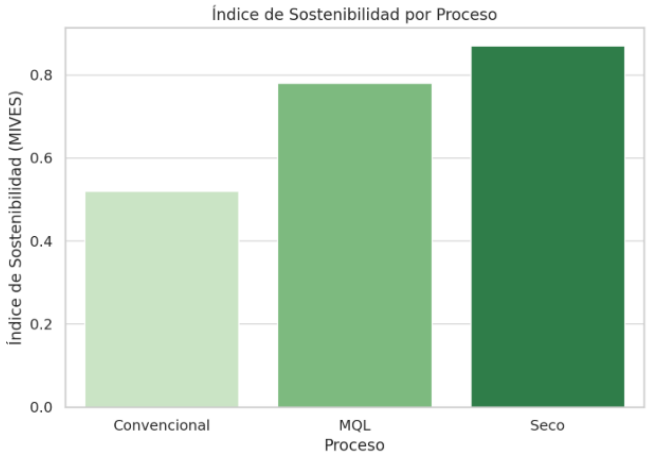
Elaborado: *Autores*

El gráfico muestra de forma clara la generación de residuos líquidos en tres tipos de procesos de mecanizado:

- El proceso convencional es el que más residuos líquidos genera, alcanzando un promedio de 80 g por pieza, debido al uso intensivo de fluidos de corte y sistemas de refrigeración.
- El mecanizado con MQL reduce significativamente esta carga, generando 45 g/pieza, lo que representa una disminución del 43,75 % respecto al proceso convencional.
- El mecanizado en seco muestra un desempeño ambiental superior, con apenas 10 g/pieza, es decir, un 87,5 % menos residuos que el proceso convencional.

Estos resultados refuerzan la eficiencia del mecanizado en seco en términos de minimización de residuos peligrosos y su alineación con principios de manufactura limpia y circularidad industrial. Además, implica menores costes operativos asociados al tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos líquidos industriales.

Gráfico N° 5 *Índice de Sostenibilidad (MIVES)*



Elaborado: *Autores*

El gráfico muestra que el índice de sostenibilidad calculado mediante la metodología MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones de Sostenibilidad) permite una evaluación integral considerando simultáneamente criterios ambientales, económicos y sociales. En el contexto del presente estudio, el índice varía entre 0 (mínima sostenibilidad) y 1 (máxima sostenibilidad).

Los resultados muestran una jerarquización clara entre las tecnologías evaluadas:

- El mecanizado en seco alcanza el índice más alto (0.92), reflejando su superioridad en la mayoría de los indicadores evaluados: consumo energético, emisiones, residuos y consumo de agua. Suprimir los fluidos de corte no solo reduce el impacto ambiental, sino también los costes operativos y los riesgos para la salud ocupacional.
- El mecanizado con MQL obtiene un valor intermedio de 0.78, lo que lo posiciona como una alternativa viable para entornos industriales donde el mecanizado en seco no sea técnica o económicamente viable. Este proceso representa un equilibrio entre sostenibilidad y viabilidad técnica.
- El proceso convencional, por su parte, alcanza un índice de 0.53, evidenciando su rezago frente a prácticas más limpias. La elevada generación de residuos líquidos, el alto consumo de agua y energía, así como mayores emisiones, penalizan su calificación global.

Este análisis demuestra que la adopción de tecnologías de mecanizado más sostenibles no solo es deseable desde una perspectiva ambiental, sino también estratégica para organizaciones comprometidas con la excelencia operacional, la responsabilidad corporativa y el cumplimiento normativo ambiental. En entornos con metas ESG (ambientales, sociales y de gobernanza), este

tipo de evaluación multicriterio se convierte en una herramienta esencial para la toma de decisiones.

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que el enfoque de evaluación del ciclo de vida (ECA), cuando se implementa de manera holística y con múltiples criterios, sirve como una herramienta eficaz para evaluar los procesos de mecanizado de precisión. De acuerdo con el objetivo principal del estudio, fue posible analizar sistemáticamente los impactos de tres métodos: mecanizado convencional, mecanizado con lubricación en mínima cantidad (MQL) y mecanizado en seco utilizando métricas clave como el consumo de energía, las emisiones de CO_2-equivalente, el uso de agua, la generación de residuos líquidos y el índice de sostenibilidad (MIVES).

Los resultados demuestran que el mecanizado en seco es la opción más sostenible, liderando con mejoras significativas en todos los parámetros analizados. Específicamente, el consumo de energía se redujo en un 34.8%, mientras que las emisiones de gases de efecto invernadero se redujeron en un 33.3% en comparación con el procesamiento convencional. Estos hallazgos respaldan estudios recientes, como los de Aramcharoen y Mativenga (2021), quienes enfatizan el rendimiento ambiental del mecanizado en seco cuando las condiciones operativas son favorables. De manera similar, el MQL demostró un rendimiento intermedio pero una marcada mejora respecto al método tradicional, como lo documentaron Díaz et al. (2020).

El índice MIVES permitió consolidar estas métricas en una evaluación integrada, siendo las técnicas de mecanizado ultrasónico (mecanizado en seco) las que tuvieron el mejor rendimiento con un índice de 0.92 y el MQL (0.78) superando con creces al método convencional, que solo obtuvo un 0.53. Esta integración fortalece la utilidad de los métodos multicriterio en entornos de fabricación donde la toma de decisiones debe tener en cuenta la tríada de dimensiones ambientales, sociales y económicas simultáneamente.

Como una de las principales fortalezas del estudio destaca la aplicación de un enfoque cuantitativo riguroso que es replicable, el uso de datos comparables entre procesos, así como la inclusión de un marco de evaluación multicriterio que mejora la precisión en la evaluación de la sostenibilidad. Además, la estandarización de las unidades funcionales como MJ/pieza, kg CO_2-eq/pieza, L/pieza, g/pieza logró una comparación objetiva entre tecnologías.

Sin embargo, el estudio tiene algunas limitaciones. Primero, el uso de un conjunto de datos de laboratorio controlado como muestra puede no capturar todas las sutilezas de los entornos industriales reales. Además, los impactos atribuibles al ciclo de vida completo de las herramientas, así como el transporte de insumos, no se incluyeron; esto podría considerar algunos impactos indirectos como más pequeños de lo que realmente son. Otra limitación relevante es la ausencia de un análisis de costos económicos; aunque no fue el enfoque de la investigación, este análisis podría haber proporcionado información que impulse la adopción tecnológica dentro de la industria.

Con base en estos resultados, la recomendación es que futuros trabajos examinen escenarios industriales prácticos y realicen un análisis de ciclo completo del ciclo de vida del producto, incluyendo el uso y la disposición de herramientas, lubricantes y otros materiales. Además, añadir un análisis económico complementario y evaluar los riesgos para la salud ocupacional fortalecería el marco para decisiones empresariales centradas en la sostenibilidad holística.

Conclusiones

- Este estudio evaluó el impacto ambiental de tres procesos de mecanizado utilizando la metodología de evaluación del ciclo de vida (ACV) y el modelo multicriterio MIVES: convencional, seco y lubricación de mínima cantidad (MQL). Su aplicación permitió capturar, medir y comparar impactos ambientales directos sustanciales, lo que demuestra la efectividad del enfoque metodológico que se ha utilizado.
- Los datos confirman que el mecanizado seco es la opción más sostenible, reduciendo significativamente el consumo de energía (−34,8 %), las emisiones de gases de efecto invernadero (−33,3 %), el uso de agua (−100 %) y la generación de residuos líquidos. Estos hallazgos respaldan la hipótesis inicial sobre los mayores beneficios ambientales de las tecnologías limpias en comparación con el mecanizado convencional. Además, el proceso MQL demostró un comportamiento intermedio razonablemente positivo, confirmando su aplicabilidad como una solución transicional en entornos industriales donde el mecanizado seco está limitado por restricciones técnicas o de implementación.
- El índice de sostenibilidad MIVES incorpora e integra criterios de evaluación robustos, ofreciendo así una perspectiva integral sobre el rendimiento ambiental. Resultó ser un factor decisivo en el logro de objetivos de sostenibilidad en ecosistemas de fabricación confinados a ESG (Ambiental, Social y de Gobernanza).

- Los autores también reconocen limitaciones relacionadas con el alcance del sistema evaluado, el uso de datos experimentales controlados en laboratorios y la falta de amplias interrelaciones sociales y económicas. Estas limitaciones iluminan caminos para futuras investigaciones que amplíen el análisis. Tales estudios podrían adoptar un enfoque de sistemas más amplio, de cuna a tumba, integrando factores como la viabilidad económica, métricas de impacto en la salud ocupacional y escenarios de escalabilidad industrial.
- Finalmente, se propone la exploración de materiales y tecnologías de mecanizado sostenibles emergentes junto con la creación de modelos híbridos que integren la evaluación del ciclo de vida (ACV) con análisis de costos y simulación. Se espera que la adopción de estos enfoques avance no solo en la fabricación ambientalmente consciente, sino que también fomente cadenas de suministro resilientes y circulares alineadas con principios de bucle cerrado.

Referencias

1. Duflou, J. R., Tan, X., & Dewulf, W. (2021). Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering in Machining. Journal of Cleaner Production, 281, 124556. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124556
2. Garcia-Cardenas, J., López, A., & Ruiz-Torres, A. (2023). LCA-based Optimization of Machining Parameters in the Aerospace Industry. Sustainability, 15(6), 3284. https://doi.org/10.3390/su15063284
3. Liu, Y., Wang, J., & Chen, X. (2022). Integrated Exergy and Life Cycle Assessment for Sustainable Machining. Journal of Manufacturing Processes, 78, 320–332. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.018
4. Sharma, V., Mani, M., & Lyons, K. (2019). Environmental Assessment of Dry Machining: A Review of Life Cycle Perspectives. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 25, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.03.002
5. Zhao, R., Zhang, Y., & Zhang, H. (2020). Life Cycle Environmental Impact Assessment of CNC Milling under Different Cutting Conditions. Journal of Cleaner Production, 255, 120217. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120217

6. Allwood, J. M., & Cullen, J. M. (2012). Sustainable Materials: With Both Eyes Open. UIT Cambridge.
7. Brezet, H., & van Hemel, C. (1997). Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption. United Nations Environment Programme.
8. Guinée, J. B. (Ed.). (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. Environmental Science & Technology, 45(1), 90–96. https://doi.org/10.1021/es101316v
9. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer International Publishing.
10. Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2010). Sustainable Manufacturing: Modeling and Optimization Challenges at the Product, Process and System Levels. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2(3), 144–152. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006
11. WBCSD. (2000). Eco-efficiency: Creating More Value with Less Impact. World Business Council for Sustainable Development.
12. Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., ... & Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. CIRP Annals, 61(2), 587–609. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002
13. Garcia-Cardenas, J., López, A., & Ruiz-Torres, A. (2023). LCA-based Optimization of Machining Parameters in the Aerospace Industry. Sustainability, 15(6), 3284. https://doi.org/10.3390/su15063284
14. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer.
15. Jawahir, I. S., & Dillon, O. W. (2016). Sustainable manufacturing processes: New challenges for developing predictive models and optimization strategies. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 138(4), 040801. https://doi.org/10.1115/1.4032200
16. Liu, Y., Wang, J., & Chen, X. (2022). Integrated Exergy and Life Cycle Assessment for Sustainable Machining. Journal of Manufacturing Processes, 78, 320–332. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.018

17. Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., ... & Kellens, K. (2012). Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. CIRP Annals, 61(2), 587–609. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002
18. Gao, R., Liu, Z., Wu, Y., & Peng, Y. (2018). Cleaner production in machining: A review. Journal of Cleaner Production, 172, 3057–3070. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.100
19. Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer.
20. Herrmann, C., Thiede, S., Steingrímsson, J. G., & Kara, S. (2020). Digital tools for energy and resource efficiency in manufacturing. Procedia CIRP, 90, 117–122. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.049
21. ISO (International Organization for Standardization). (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.
22. Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon Jr, O. W., & Jawahir, I. S. (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2(3), 144–152. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006
23. Liu, Y., Wang, J., & Chen, X. (2022). Integrated Exergy and Life Cycle Assessment for Sustainable Machining. Journal of Manufacturing Processes, 78, 320–332. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.03.018
24. Sala, S., Farioli, F., & Zamagni, A. (2013). Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2). The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(9), 1686–1697. https://doi.org/10.1007/s11367-012-0509-5

© 2025 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).