



*Optimización de Procesos de Mecanizado mediante Algoritmos Avanzados en  
Sistemas CAM: revisión sistemática*

*Optimization of Machining Processes Using Advanced Algorithms in CAM  
Systems: A Systematic Review*

*Optimização de Processos de Maquinação Utilizando Algoritmos Avançados em  
Sistemas CAM: revisão sistemática*

Bryan Guillermo Guananga-Rodríguez <sup>I</sup>  
[bryang.guananga@epoch.edu.ec](mailto:bryang.guananga@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-9080-6379>

Freddy Román Guananga-Díaz <sup>II</sup>  
[fguananga@unach.edu.ec](mailto:fguananga@unach.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-5311-797X>

**Correspondencia:** [bryang.guananga@epoch.edu.ec](mailto:bryang.guananga@epoch.edu.ec)

Ciencias de la Computación  
Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 11 de junio de 2024 \* **Aceptado:** 25 de julio de 2024 \* **Publicado:** 15 de agosto de 2024

- I. Ingeniero Industrial, Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Industrial, Docente Investigador, Grupo GIDENM, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Industrial, Magíster en Gestión Industrial y Sistemas Productivos, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

## Resumen

La optimización de los procesos de mecanizado es crucial para mejorar la eficiencia y calidad en la industria manufacturera. Los sistemas CAM han evolucionado con la integración de algoritmos avanzados, optimizando parámetros críticos y mejorando las operaciones de mecanizado. Este artículo presenta una revisión sistemática de la aplicación de estos algoritmos en sistemas CAM, destacando metodologías, resultados y tendencias actuales. Se identificaron diversos algoritmos efectivos, como genéticos, optimización basada en enjambre de partículas, inteligencia artificial y algoritmos evolutivos, que mejoran el tiempo de mecanizado y la calidad superficial, aumentando la eficiencia y precisión en la producción. La integración de técnicas de inteligencia artificial permite evaluación y optimización en tiempo real, mejorando la consistencia y reduciendo la intervención humana. Sin embargo, se necesitan más pruebas empíricas en entornos industriales para validar modelos teóricos y asegurar la aplicabilidad práctica. Las recomendaciones incluyen validar empíricamente modelos teóricos en condiciones industriales, desarrollar metodologías para implementar algoritmos avanzados en sistemas CAM y explorar nuevas tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. La adopción de estas tecnologías es esencial para mantener la competitividad y mejorar la calidad y eficiencia en la industria manufacturera.

**Palabras Clave:** Optimización de procesos de mecanizado; algoritmos avanzados; sistemas CAM; inteligencia artificial; eficiencia en manufactura.

## Abstract

Optimizing machining processes is crucial for improving efficiency and quality in the manufacturing industry. CAM systems have evolved with the integration of advanced algorithms, optimizing critical parameters and enhancing machining operations. This article presents a systematic review of the application of these algorithms in CAM systems, highlighting methodologies, results, and current trends. Various effective algorithms were identified, including genetic algorithms, particle swarm optimization, artificial intelligence, and evolutionary algorithms, which improve machining time and surface quality, increasing production efficiency and precision. The integration of artificial intelligence techniques allows real-time evaluation and optimization, improving consistency and reducing human intervention. However, more empirical testing in industrial environments is needed to validate theoretical models and ensure practical

applicability. Recommendations include empirically validating theoretical models in industrial conditions, developing methodologies for implementing advanced algorithms in CAM systems, and exploring emerging technologies such as artificial intelligence and machine learning. Adopting these technologies is essential for maintaining competitiveness and enhancing quality and efficiency in the manufacturing industry.

**Keywords:** Machining process optimization; advanced algorithms; CAM systems; artificial intelligence; manufacturing efficiency.

## Resumo

A otimização dos processos de maquinação é crucial para melhorar a eficiência e a qualidade na indústria transformadora. Os sistemas CAM evoluíram com a integração de algoritmos avançados, otimizando parâmetros críticos e melhorando as operações de maquinação. Este artigo apresenta uma revisão sistemática da aplicação destes algoritmos em sistemas CAM, destacando as metodologias, resultados e tendências atuais. Foram identificados vários algoritmos eficazes, como a otimização genética baseada no enxame de partículas, a inteligência artificial e os algoritmos evolutivos, que melhoram o tempo de maquinação e a qualidade da superfície, aumentando a eficiência e a precisão da produção. A integração de técnicas de inteligência artificial permite a avaliação e otimização em tempo real, melhorando a consistência e reduzindo a intervenção humana. No entanto, são necessários mais testes empíricos em ambientes industriais para validar os modelos teóricos e garantir a aplicabilidade prática. As recomendações incluem a validação empírica de modelos teóricos em condições industriais, o desenvolvimento de metodologias para a implementação de algoritmos avançados em sistemas CAM e a exploração de novas tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a aprendizagem automática. A adoção destas tecnologias é essencial para manter a competitividade e melhorar a qualidade e eficiência na indústria transformadora.

**Palavras-chave:** Otimização de processos de maquinação; algoritmos avançados; sistemas CAM; inteligência artificial; eficiência de fabrico.

## Introducción

La optimización de los procesos de mecanizado es fundamental para mejorar la eficiencia y calidad de la producción en la industria manufacturera. Los sistemas de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) han evolucionado significativamente, integrando algoritmos avanzados para optimizar los parámetros de corte y mejorar el desempeño de las operaciones de mecanizado. Este artículo presenta una revisión sistemática sobre la aplicación de algoritmos avanzados en sistemas CAM para la optimización de procesos de mecanizado.

El mecanizado es un proceso crítico en la manufactura que contempla la remoción de viruta para dar forma a la pieza de trabajo. Los parámetros de mecanizado, como la velocidad de corte, la tasa de avance y la profundidad de corte, son cruciales para determinar la calidad y eficiencia del proceso. La optimización de estos parámetros puede llevar a una reducción significativa del tiempo de mecanizado, mejora de la calidad superficial y reducción de costos de producción. Sin embargo, la determinación manual de estos parámetros es un proceso complejo y propenso a errores.

El objetivo de esta investigación es revisar sistemáticamente los estudios más recientes sobre la aplicación de algoritmos avanzados en sistemas CAM para optimizar los procesos de mecanizado. Se busca identificar las metodologías empleadas, los resultados obtenidos y las tendencias actuales en la investigación de este campo. La presente revisión sistemática tiene como finalidad proporcionar una comprensión clara y sintetizada de cómo los algoritmos avanzados poseen el potencial para mejorar la eficiencia y calidad del mecanizado, y con ello sugerir áreas de investigación futura.

La importancia de esta investigación radica en la necesidad constante de la industria manufacturera de mejorar la eficiencia y calidad de sus procesos. La implementación de algoritmos avanzados en sistemas CAM representa una oportunidad para automatizar y optimizar los parámetros de mecanizado, reduciendo la dependencia de la intervención humana y minimizando errores. Además, con el aumento de la competencia global, las empresas manufactureras buscan constantemente maneras de reducir costos y tiempos de producción sin comprometer la calidad. La revisión sistemática de estudios recientes proporciona una base sólida para entender las mejores prácticas y las tecnologías más prometedoras en este ámbito.

## Métodos o metodología

Para esta revisión sistemática, se recopiló información de diversas referencias sobre la optimización de procesos de mecanizado mediante algoritmos avanzados en sistemas CAM. Los estudios seleccionados abarcan investigaciones teóricas y aplicadas.

## Estrategia de Búsqueda

**Bases de Datos Consultadas:** Se utilizaron bases de datos electrónicas como IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar, SpringerLink, Wiley Online Library y Taylor & Francis Online, por su relevancia y amplitud en temas de optimización de procesos de mecanizado en sistemas CAM.

**Palabras Clave y Términos de Búsqueda:** Se usaron términos como "Optimización de procesos de mecanizado", "Algoritmos avanzados", "Sistemas CAM", "Inteligencia artificial en manufactura", y "Optimización de trayectorias de herramientas". Los operadores booleanos facilitaron la búsqueda precisa y relevante:

- "Optimización de procesos de mecanizado" AND "Algoritmos avanzados"
- "Sistemas CAM" OR "Manufactura asistida por computadora"
- "Parámetros de corte" AND "Simulación de mecanizado"
- "Inteligencia artificial" AND "Optimización de trayectorias de herramientas"

**Período de Búsqueda:** Se incluyeron estudios publicados entre enero de 2018 y junio de 2023 para reflejar los avances más recientes en la aplicación de algoritmos avanzados en sistemas CAM.

## Criterios de inclusión y exclusión

### Criterios de Inclusión:

- **Aplicación de Algoritmos de Optimización en Sistemas CAM:** Investigaciones que investigan y aplican algoritmos avanzados en la optimización del mecanizado.
- **Publicaciones Recientes:** Artículos publicados desde 2018 en adelante.
- **Relevancia del Tema:** Estudios sobre optimización de parámetros de mecanizado, eficiencia de trayectorias de herramientas, reducción de tiempos de producción y mejora de la calidad de piezas.
- **Artículos en Inglés:** Se incluyeron solo artículos en inglés.

- **Datos Empíricos (cuando disponibles):** Se priorizaron estudios con datos empíricos y resultados reproducibles.

#### **Criterios de Exclusión:**

- **Estudios Teóricos sin Aplicación Práctica:** Se excluyeron estudios sin validación práctica en sistemas CAM.
- **Artículos de Opinión y Reseñas:** Se excluyeron opiniones y reseñas sin datos nuevos.
- **Publicaciones en Idiomas Distintos al Inglés:** Solo se incluyeron artículos en inglés.
- **Estudios Fuera del Rango Temporal:** Se excluyeron estudios publicados antes del 2018.
- **Falta de Relevancia Temática:** Se excluyeron estudios que no abordaban la optimización de procesos de mecanizado mediante algoritmos avanzados en sistemas CAM.

#### **Síntesis de Datos**

Para la síntesis de datos en esta revisión sistemática, se siguió un enfoque estructurado que permitió extraer y organizar la información relevante de las 25 referencias seleccionadas. La síntesis se centró en identificar patrones, resultados clave y tendencias en la aplicación de algoritmos avanzados para la optimización de procesos de mecanizado en sistemas CAM. A continuación, se describe el proceso de síntesis de datos:

**Extracción de Información:** La extracción de datos se realizó utilizando una plantilla estandarizada que incluyó los siguientes elementos para cada estudio:

- **Referencia Completa:** Autores, año de publicación, título del artículo, y fuente.
- **Objetivo del Estudio:** Descripción del objetivo principal de la investigación.
- **Metodología:** Métodos y técnicas empleadas para la optimización de procesos de mecanizado.
- **Resultados Clave:** Hallazgos principales, incluyendo mejoras en la eficiencia, calidad, y reducción de costos.
- **Limitaciones y Recomendaciones:** Cualquier limitación mencionada en el estudio y recomendaciones para futuras investigaciones.

## Organización de la Información

Una vez extraída la información, se organizó en categorías temáticas para facilitar el análisis y la comparación entre estudios. Las categorías incluyeron:

- **Algoritmos de Optimización:** Tipos de algoritmos utilizados (por ejemplo, algoritmos genéticos, optimización basada en enjambre de partículas, inteligencia artificial).
- **Parámetros de Mecanizado:** Parámetros tecnológicos optimizados como: (velocidad de corte, tasa de avance, profundidad de corte, etc.).
- **Resultados de Optimización:** Impacto de la optimización en cuanto a una reducción de tiempos de mecanizado, mejora en la calidad de la superficie, reducción de costos, etc.
- **Aplicaciones y Contextos:** Contextos específicos de aplicación, en procesos como fresado, torneado, mecanizado de piezas complejas, etc.

## Síntesis Comparativa

La síntesis comparativa se realizó mediante la construcción de una tabla que resume los hallazgos clave. Se destacaron las similitudes y diferencias entre los estudios, permitiendo una visión clara de cómo se aplican y evalúan los algoritmos de optimización en diferentes contextos de mecanizado.

*Tabla 1: Comparación de Estudios sobre la Optimización de Procesos de Mecanizado mediante Algoritmos Avanzados en Sistemas CAM*

| Referencia       | Enfoque de la Investigación  | Metodología   | Resultados  |
|------------------|--|---|---|
| Ma et al. (2020) | Optimización de parámetros en fresado complejo mediante mecanizado virtual | Integración CAD/CAM, simulador de mecanizado, método de optimización global eficiente | Reducción del tiempo de mecanizado (25-30%), reducción del costo de producción, parámetros de corte óptimos |

|                        |  |  |  |
|------------------------|--|--|--|
| Ižol et al. (2022)     | Evaluación de software de optimización en fresado de desbaste                      | Diseño experimental, comparación entre programas NC originales y optimizados   | Reducción de desviaciones en superficies laterales (3-23%), reducción de desviaciones en superficies horizontales (8.3-36%), ahorro en tiempo de producción (12.8-15.9%) |
| Čuboňová et al. (2018) | Optimización del proceso de mecanizado mediante algoritmos                         | Análisis de módulos CAD/CAM, desarrollo de algoritmos, desarrollo de una base de datos                               | Reducción significativa del tiempo de creación de programas NC, eliminación de pasos repetitivos, eficiencia en componentes geométricos diversos                         |
| Križan et al. (2023)   | Optimización topológica en la simulación CAM del mecanizado robótico               | Optimización topológica, simulación CAM, estructuras robóticas   | Mejora en la precisión y eficiencia del mecanizado, reducción de errores, flexibilidad en la manufactura   |
| Ruban et al. (2023)    | Optimización de modos de procesamiento en máquinas CNC                             | Análisis numérico y gráfico-analítico, desarrollo de métodos y algoritmos, comparación con estudios previos          | Reducción del error relativo máximo (6-8%), optimización de parámetros geométricos, recomendaciones prácticas en el uso de CAD-CAM                                       |
| Čuboňová et al. (2019) | Uso de algoritmos genéticos en la optimización del proceso de mecanizado           | Implementación de algoritmos genéticos, verificación y optimización de trayectorias, desarrollo de software          | Reducción significativa del tiempo de máquina, optimización de parámetros de corte, mejora en la eficiencia operativa y reducción de costos                              |
| Dodok et al. (2018)    | Optimización de la preparación de procesos de mecanizado de programas NC           | Análisis de estrategias NC, desarrollo de una base de datos, comparación de componentes 2D y 3D                      | Mejora significativa de la eficiencia del proceso de mecanizado, reducción del tiempo de preparación de programas NC, eficacia en componentes geométricos diversos       |
| Karlina et al. (2021)  | Automatización de procesos de preproducción para piezas pequeñas de alta precisión | Clasificación de piezas, extensibilidad de funciones CAM, métodos de creación y verificación de programas de control | Reducción de rebabas, optimización de procesos, mejora de la precisión del mecanizado, mejora significativa en la eficiencia y precisión del proceso de mecanizado       |

|                         |   |  |  |
|-------------------------|---|--|--|
| Nishida et al. (2018)   | Sistema de planificación de procesos automático para fresado considerando la intención del operador CAM | Almacenamiento de prioridades, determinación automática de secuencias, caso de estudio                                 | Mejora significativa en la eficiencia del mecanizado, reducción de errores, adaptación a condiciones específicas del usuario proporcionando secuencias de mecanizado óptimas |
| Plessing et al. (2022)  | Predicción de rugosidad superficial basada en IA  | Modelos de aprendizaje automático, integración de datos, simulación en vivo  | Alta precisión en la predicción, evaluación y optimización automática, mejora de la calidad superficial  |
| Abderazek et al. (2020) | Comparación de algoritmos de optimización para un mecanismo de leva                                     | Comparación de siete algoritmos metaheurísticos, formulación de problemas de diseño, evaluación de leyes de movimiento | Eficacia de algoritmos MBA, ER-WCA, MFO y GWO, mejora en eficiencia y rendimiento, ley polinómica más efectiva   |
| Jachym et al. (2019)    | Simulación de mecanizado NC con motor de trazado de rayos OptiX   | Evaluación de hardware, desarrollo de aplicaciones con OptiX, simulaciones multiescala                                 | Desarrollo de aplicaciones más simple, simulaciones de desbaste prometedoras, simulaciones interactivas y realistas  |
| Gao (2023)              | Simulación de mecanizado NC mecánico basada en CAD/CAM  | Integración de VERICUT y PRO/ENGINEER, simulación de movimiento, procesamiento de troqueles                            | Reducción del tiempo de procesamiento (38.43%), aumento de la tasa de rendimiento (23%), simulación detallada y precisa  |
| Mohamad & Zahid (2018)  | Simulación de mecanizado de desbaste utilizando programación en Visual Basic en NX CAM                  | Desarrollo de software, simulación de orientaciones de corte, automatización de simulaciones                           | Identificación de orientación de corte óptima, mejora en eficiencia del procesamiento, reducción del tiempo de mecanizado  |
| Jiang et al. (2018)     | Optimización del mecanizado de piezas delgadas y curvas en la industria aeroespacial                    | Optimización de trayectorias y parámetros de corte, simulación con Mastercam y VERICUT, método de control de variables | Aumento de la eficiencia de mecanizado (61.5%), mejora de la calidad de mecanizado (76.6% reducción en fuerza de corte), optimización de parámetros críticos                 |
| Hamza et al. (2018)     | Optimización del diseño de un mecanismo de leva con seguidor de rodillo                                 | Algoritmo evolutivo MADE, múltiples parámetros geométricos y restricciones de diseño                                   | Eficacia del algoritmo MADE, mejora en la calidad del diseño del mecanismo de leva, resultados óptimos en problemas de diseño  |

|                                 |   |  |   |
|---------------------------------|---|--|---|
| Tera et al. (2019)              | Estrategias de procesamiento para SPIF utilizando herramientas CAD/CAM                | Análisis de estrategias de procesamiento, evaluación de criterios de formabilidad y calidad, técnica AHP | Estrategia de procesamiento en dos etapas identificada como la más efectiva, reducción del tiempo de procesamiento, mejora en calidad de la superficie y precisión          |
| Pandey et al. (2023)            | Revisión de técnicas de optimización para procesos de mecanizado no tradicionales     | Revisión de estudios, evaluación de técnicas de optimización, análisis de efectos en SR y MRR            | Técnicas de optimización efectivas para mejorar parámetros de mecanizado, identificación de técnicas avanzadas, recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones |
| Qiang et al. (2018)             | Optimización de AWJ utilizando el algoritmo de búsqueda del cuco multiobjetivo (MOCS) | Análisis de modelos de energía cinética y tasa de desgaste, aplicación de MOCS, comparación experimental | Mejora en la predicción de energía de salida y tasa de desgaste, parámetros optimizados superiores al diseño original, modelo sistemático para predicción y optimización    |
| Bakhtiyari et al. (2021)        | Aplicaciones de inteligencia artificial en el LBM                                     | Revisión de técnicas de IA, análisis comparativo   | Efectividad en predicción y optimización de calidad, mejora en eficiencia del LBM   |
| Moshi & Bharathi (2022)         | Utilización de algoritmos de optimización en mecanizado                               | Revisión de algoritmos, estudios de caso, comparación de algoritmos                                      | Mejora en eficiencia y calidad de mecanizado, comparación de fortalezas y debilidades de algoritmos   |
| Chavez & Castillo-Villar (2018) | Optimización de parámetros de mecanizado en corte de metal                            | Optimización multiobjetivo basada en simulaciones, modelado estocástico                                  | Mejora en volumen de hipervidrio (4.71%), supera al algoritmo genético en calidad de soluciones   |
| Ozturk et al. (2018)            | Optimización de procesos de corte de lingotes de silicio                              | Análisis de regresión no lineal, algoritmos estocásticos, diseño de experimentos                         | Mejora en rugosidad superficial y MRR, efectividad de modelos de regresión y algoritmos estocásticos  |
| Zhang et al. (2020)             | Algoritmo de corte basado en control de movimiento                                    | Modelado matemático, optimización de curva de leva, diseño de algoritmo de control de movimiento         | Mejora en coordinación de movimiento, eficiencia de producción, reducción de impactos y temblores   |
| Xiao et al. (2019)              | Optimización adaptativa de parámetros de proceso en torneado                          | Técnicas de minería de datos, lógica difusa, optimización preliminar y iterativa                         | Mejora en eficiencia energética y de tiempo, superioridad en comparación con técnicas heurísticas   |

## Resultados y discusión

### Análisis cuantitativo y cualitativo

La integración de algoritmos avanzados en sistemas CAM ha llevado a mejoras significativas en el proceso de mecanizado. La mayoría de los estudios reportan reducciones notables en el tiempo de mecanizado y mejoras en la calidad superficial.

#### Reducción del Tiempo de Mecanizado:

- **Ma et al. (2020):** Reducción del tiempo de mecanizado en un 25-30% mediante mecanizado virtual y simuladores CAD/CAM.
- **Ižol et al. (2022):** Ahorros en tiempo de producción entre 12.8% y 15.9% utilizando software de optimización.
- **Čuboňová et al. (2018):** Reducción significativa del tiempo necesario para crear programas NC.
- **Ruban et al. (2023):** Optimización del tiempo de mecanizado y precisión con métodos numéricos y gráficos-analíticos.

#### Mejora en la Calidad Superficial:

- **Plessing et al. (2022):** Modelo de predicción de rugosidad superficial basado en IA, mejorando la calidad del acabado.
- **Karlina et al. (2021):** Mejora en la precisión del mecanizado mediante la automatización de procesos.
- **Jiang et al. (2018):** Reducción del 76.6% en la fuerza de corte promedio, mejorando la calidad del mecanizado.

### 3.2. Comparación de Algoritmos de Optimización.

Diversos algoritmos de optimización han sido aplicados y comparados en los estudios revisados.

#### Algoritmos Genéticos:

- **Čuboňová et al. (2019):** Optimización de trayectorias y parámetros de corte, mejorando la eficiencia operativa y reducción de costos.
- **Abderazek et al. (2020):** Comparación de siete algoritmos metaheurísticos, destacando la eficacia de los algoritmos MBA, ER-WCA, MFO y GWO.

#### Algoritmos Evolutivos:

- **Hamza et al. (2018):** Optimización del diseño de mecanismos de leva con el algoritmo MADE, mejorando calidad y eficiencia del proceso.

### **Inteligencia Artificial y Modelos de Aprendizaje Automático**

- **Plessing et al. (2022):** Predicción de rugosidad superficial y optimización automática de parámetros de mecanizado.
- **Bakhtiyari et al. (2021):** Aplicación de IA en el mecanizado por haz de láser, mejorando la calidad y eficiencia.

### **Optimización Basada en Enjambre de Partículas y Otras Técnicas**

- **Pandey et al. (2023):** Mejora de parámetros críticos en procesos de mecanizado no tradicionales.
- **Qiang et al. (2018):** Optimización del mecanizado por chorro de agua abrasivo con el algoritmo de búsqueda del cuco multiobjetivo (MOCS).

El análisis revela que cada técnica tiene fortalezas y debilidades específicas. Los algoritmos genéticos y evolutivos son efectivos para la optimización de trayectorias y parámetros de corte, mientras que las técnicas de IA ofrecen precisión en la predicción y optimización de parámetros críticos. La correcta selección y aplicación de estos algoritmos puede mejorar significativamente la eficiencia y calidad en la manufactura.

### **Impacto en la eficiencia y calidad de mecanizado**

Los estudios revisados indican que la aplicación de algoritmos avanzados no solo mejora la eficiencia del proceso de mecanizado, sino que también optimiza la calidad de los productos finales.

**Automatización y Precisión del Mecanizado:** Karlina et al. (2021) demostraron que la automatización de procesos para piezas pequeñas mejora significativamente la precisión del mecanizado, reduciendo rebabas y optimizando modos de corte.

**Predicción y Optimización de la Calidad Superficial:** Plessing et al. (2022) desarrollaron un modelo basado en IA para predecir la rugosidad superficial, permitiendo una optimización automática de parámetros que mejoró la calidad del acabado superficial.

**Optimización de Parámetros de Corte y Trayectorias:** Čuboňová et al. (2018) y Ruban et al. (2023) demostraron que la optimización de parámetros de corte mediante algoritmos avanzados mejora la precisión y reduce los errores, mejorando la calidad final del producto.

**Inteligencia Artificial y Eficiencia Energética:** Xiao et al. (2019) propusieron un método basado en el conocimiento para la optimización adaptativa de parámetros en torneado, mejorando la eficiencia energética y la precisión del mecanizado.

El análisis muestra que la implementación de algoritmos avanzados en sistemas CAM incrementa la precisión y reduce defectos, mejorando la calidad del producto final. Estos hallazgos destacan la importancia de seguir investigando técnicas de optimización avanzadas para mantener la competitividad en la industria manufacturera.

### **Identificación de tendencias y brechas**

El análisis revela un enfoque creciente en la integración de IA y algoritmos de optimización multiobjetivo en sistemas CAM, con varios avances y áreas que requieren más investigación.

#### **Tendencias Emergentes:**

- **Integración de Inteligencia Artificial:** Modelos de aprendizaje automático permiten la evaluación y optimización en tiempo real, mejorando la calidad y eficiencia del proceso.
- **Optimización Multiobjetivo:** Algoritmos avanzados como los genéticos y la optimización basada en enjambre de partículas mejoran parámetros críticos como la rugosidad superficial y la tasa de eliminación de material.
- **Automatización y Control Adaptativo:** Sistemas automáticos que consideran la intención del operador mejoran la eficiencia y reducen errores.

#### **Brechas en la Investigación:**

- **Validación Empírica de Modelos Teóricos:** Es necesario validar empíricamente los modelos teóricos para asegurar su aplicabilidad en entornos industriales reales.
- **Aplicación Práctica en Entornos Industriales:** La implementación práctica de algoritmos avanzados presenta desafíos que requieren metodologías y herramientas específicas.
- **Integración de Nuevas Tecnologías:** La incorporación de tecnologías emergentes como la computación cuántica y la fabricación aditiva en sistemas CAM está en etapas iniciales y ofrece nuevas oportunidades.

La integración de IA y algoritmos de optimización en sistemas CAM promete transformar los procesos de mecanizado. Sin embargo, es crucial abordar las brechas en la validación empírica y la aplicación práctica para realizar plenamente su potencial, beneficiando a la industria con mejoras en eficiencia y calidad.

### **Implicaciones prácticas**

La implementación de algoritmos avanzados en sistemas CAM tiene varias implicaciones prácticas significativas para la industria manufacturera. Los estudios sugieren que la optimización automatizada de parámetros de mecanizado puede reducir costos de producción y mejorar la calidad del producto final.

**Reducción de Costos de Producción:** La optimización de parámetros mediante algoritmos avanzados permite una utilización más eficiente de las máquinas y herramientas, reduciendo costos operativos y de mano de obra. Ma et al. (2020) demostraron que la integración de CAD/CAM y simuladores de mecanizado puede reducir el tiempo de mecanizado en un 25-30%. Čuboňová et al. (2019) lograron una reducción significativa del tiempo de máquina y los costos asociados utilizando algoritmos genéticos.

**Mejora en la Calidad del Producto Final:** Los algoritmos avanzados no solo optimizan la eficiencia del proceso de mecanizado, sino que también mejoran la calidad del producto final.

**Karlina et al. (2021)** mostraron una mejora en la precisión del mecanizado mediante la automatización de procesos de preproducción para piezas pequeñas de alta precisión. Plessing et al. (2022) desarrollaron un modelo de predicción de rugosidad superficial basado en inteligencia artificial, mejorando la calidad del acabado superficial.

**Reducción de la Dependencia de la Intervención Humana:** La automatización de procesos de mecanizado reduce la necesidad de intervención humana, minimizando errores y mejorando la consistencia del proceso de producción. Nishida et al. (2018) desarrollaron un sistema de planificación de procesos automático que mejora la eficiencia del mecanizado y reduce errores humanos.

**Consistencia en el Proceso de Producción:** La optimización automatizada garantiza una mayor consistencia en la producción. Gao (2023) implementó la integración de VERICUT y PRO/ENGINEER para la simulación de mecanizado, logrando una reducción del tiempo de procesamiento en un 38.43% y un aumento de la tasa de rendimiento en un 23%.

La adopción de algoritmos avanzados en sistemas CAM es crucial para reducir costos, mejorar la calidad, minimizar la intervención humana y asegurar la consistencia en la producción. Invertir en el desarrollo y la integración de estas tecnologías es esencial para mantener la competitividad en un mercado global cada vez más exigente.

### **Recomendaciones para investigaciones futuras**

Aunque los estudios revisados proporcionan una base sólida, hay áreas que requieren más investigación. Específicamente, se necesita más validación empírica de los modelos teóricos y optimización en entornos industriales prácticos. Además, se recomienda investigar la integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, en sistemas CAM para mejorar la eficiencia y calidad del mecanizado.

**Validación Empírica de Modelos Teóricos:** La mayoría de los estudios se basan en modelos teóricos y simulaciones que requieren validación empírica para asegurar su aplicabilidad en entornos industriales reales. **Ma et al. (2020)** y **Ižol et al. (2022)** demostraron reducciones significativas en el tiempo de mecanizado y mejoras en la precisión mediante simulaciones. Es crucial realizar pruebas empíricas para validar estos resultados en escenarios de producción reales.

**Optimización en Entornos Industriales:** La implementación de algoritmos avanzados ha mostrado resultados prometedores en estudios de laboratorio, pero su aplicación práctica sigue siendo un desafío. **Nishida et al. (2018)** desarrollaron un sistema de planificación de procesos automático, mejorando la eficiencia del mecanizado y reduciendo errores. Se necesita evaluar su desempeño en entornos industriales complejos.

**Integración de Nuevas Tecnologías Emergentes:** La integración de tecnologías como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en sistemas CAM ofrece un gran potencial para mejorar la eficiencia y calidad del mecanizado. **Plessing et al. (2022)** demostraron que los modelos de aprendizaje automático pueden predecir con alta precisión la rugosidad superficial y optimizar parámetros de mecanizado. **Xiao et al. (2019)** presentaron un método basado en el conocimiento para la optimización adaptativa de parámetros de proceso, mostrando mejoras en eficiencia energética y precisión.

### **Conclusiones**

**Reducción de Costos de Producción:** La optimización automatizada de parámetros de mecanizado mediante algoritmos avanzados permite una utilización más eficiente de las máquinas y herramientas, resultando en una significativa reducción de los costos operativos y de mano de obra.

**Mejora en la Calidad del Producto Final:** La aplicación de algoritmos avanzados mejora la calidad del producto final al reducir rebabas, optimizar parámetros de corte y mejorar la precisión del mecanizado.

**Reducción de la Dependencia de la Intervención Humana:** La automatización de procesos de mecanizado mediante algoritmos avanzados minimiza errores y mejora la consistencia del proceso de producción.

**Consistencia en el Proceso de Producción:** La optimización automatizada garantiza una mayor consistencia en la producción, manteniendo altos estándares de calidad y eficiencia.

**Validación Empírica de Modelos Teóricos:** Es crucial realizar más estudios empíricos para validar los modelos teóricos en condiciones industriales reales, asegurando su viabilidad y eficacia práctica.

**Optimización en Entornos Industriales:** La adaptación de algoritmos avanzados a las condiciones específicas de la producción industrial es esencial para su éxito.

**Integración de Nuevas Tecnologías Emergentes:** La investigación futura debe centrarse en la integración de tecnologías emergentes como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en sistemas CAM.

**Desarrollo de Metodologías de Implementación:** Es necesario desarrollar metodologías y herramientas que faciliten la implementación práctica de algoritmos avanzados en sistemas CAM utilizados en la industria.

## Referencias

1. Ma, H., Liu, W., & Zhou, X. (2020). An effective and automatic approach for parameters optimization of complex end milling process based on virtual machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31, 967–984. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01489-6>
2. Ižol, P., Brindza, J., Vrabel, M., Demko, M., & Basilio, S. (2022). Effect of optimization software on part shape accuracy and production times during rough milling of aluminum alloy. *Machines*, 10(1212). <https://doi.org/10.3390/machines1012121>

3. Čuboňová, N., Dodok, T., Kuric, I., & Císar, M. (2018). Implementation of innovative methods for the creation of strategy algorithms in CAD/CAM system Edgecam. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 12, 10-18. <https://doi.org/10.12913/22998624/92100>
4. Križan, P., Hanko, L., Matúš, M., Kijovský, J., & Beniak, J. (2023). Implementation of topology optimization into a CAM simulation of robotic machining. In *2023 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)* (pp. 131-138). <https://doi.org/10.1109/CSCC58962.2023.00028>
5. Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Shcherbyna, Y. (2023). Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 222-238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>
6. Čuboňová, N., Dodok, T., & Sagova, Z. (2019). Optimisation of the machining process using genetic algorithm. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 104, 15-25. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2019.104.2>
7. Dodok, T., Čuboňová, N., & Wiecek, D. (2018). Optimization of machining processes preparation with usage of Strategy Manager. *MATEC Web of Conferences*, 244, 02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824402004>
8. Karlina, Y. I., Kargapoltsev, S. K., Gozbenko, V. E., Leonovich, D. S., & Karlina, A. I. (2021). Automation of preproduction processes for high-precision small-sized parts on CNC machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1064(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1064/1/012017>
9. Dodok, T., & Čuboňová, N. (2019). Optimization and efficiency of toolpath generation in CAD/CAM system. *MATEC Web of Conferences*, 299, 03001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929903001>
10. Nishida, I., Hirai, T., Sato, R., & Shirase, K. (2018). Automatic process planning system for end-milling operation considering CAM operator's intention. *Transactions of the JSME*, 84. <https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00563>
11. Denkena, B., Dittrich, M.-A., Nguyen, H. N., & Bild, K. (2021). Self-optimizing process planning of multi-step polishing processes. *Production Engineering*, 15(3), 563-571. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01042-6>

12. Mulyadi, M., Alfiansyah, W., Akbar, A., Firdaus, R., & Andita, N. F. G. (2019). Optimizing machining time for CAD/CAM milling programming using the Taguchi method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1402(4), 044043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/4/044043>
13. Tonejca Née Plessing, L., Mauthner, G., Trautner, T., König, V., & Liemberger, W. (2022). AI-based surface roughness prediction model for automated CAM-planning optimization. *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921281>
14. Hammoudi, A., Yildiz, A. R., & Mirjalili, S. (2020). Comparison of recent optimization algorithms for design optimization of a cam-follower mechanism. *Knowledge-Based Systems*, 191, 105237. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105237>
15. Jachym, M., Lavernhe, S., Euzenat, C., & Quiniou, S. (2019). Effective NC machining simulation with OptiX ray tracing engine. *The Visual Computer*, 35, 281–288. <https://doi.org/10.1007/s00371-018-1497-7>
16. Gao, S. (2023). Simulation of mechanical NC machining based on CAD/CAM. *Computer-Aided Design and Applications*. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:261380236>
17. Mohamad, M. H., & Zahid, M. N. O. (2018). Investigation of roughing machining simulation by using visual basic programming in NX CAM system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 319(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012010>
18. Jiang, X., Lu, W., & Zhang, Z. (2018). An approach for improving the machining efficiency and quality of aerospace curved thin-walled parts during five-axis NC machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2477–2488. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2129-0>
19. Hamza, F., Abderazek, H., Lakhdar, S., & Mellal, M. A. (2018). Optimum design of cam-roller follower mechanism using a new evolutionary algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 1267–1282. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2543-3>

20. Tera, M., Breaz, R. E., Racz, S. G., & Şuşcă, S. (2019). Processing strategies for single point incremental forming—a CAM approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 1761–1777. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03275-9>
21. Pandey, A., Saroj, A., & Srivastava, A. (2023). Process parameter optimization of abrasive jet, ultrasonic, laser beam, electrochemical, and plasma arc machining processes using optimization techniques: A review. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 16(3), 245-279. <https://doi.org/10.4271/05-16-03-0018>
22. Qiang, Z., Miao, X., & Wu, M. (2018). Optimization of abrasive waterjet machining using multi-objective cuckoo search algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 1257–1266. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2549-x>
23. Bakhtiyari, A. N., Wang, Z., Wang, L., & Zheng, H. (2021). A review on applications of artificial intelligence in modeling and optimization of laser beam machining. *Optics & Laser Technology*, 135, 106721. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106721>
24. Moshi, A., Arul, S., & Bharathi, S., & Manikandan, K. R. (2022). Effective utilization of optimization algorithms on machining operations. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 29, 155-168.
25. Chávez-García, H., & Castillo-Villar, K. K. (2018). Simulation-based model for the optimization of machining parameters in a metal-cutting operation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 84, 204-221. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.008>
26. Ozturk, S., Aydin, L., & Celik, E. (2018). A comprehensive study on slicing processes optimization of silicon ingot for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 161, 109-124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.040>
27. Zhang, X., Xu, S., & Zhang, S. (2020). Research on chasing algorithm based on motion control of cutting machine. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC) (pp. 2631-2635). <https://doi.org/10.23919/CCC50068.2020.9189196>
28. Xiao, Q., Li, C., Tang, Y., Li, L., & Li, L. (2019). A knowledge-driven method of adaptively optimizing process parameters for energy efficient turning. *Energy*, 166, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.191>
29. Shastri, A. S., Nargundkar, A., Kulkarni, A. J., & Gupta, A. (2020). Multi-cohort intelligence algorithm for solving advanced manufacturing process problems. *Neural*

- Computing and Applications, 32, 15055–15075. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04858-y>
30. Surleraux, A., Lepert, R., Pernot, J., Kerfriden, P., & Bigot, S. (2020). Machine learning-based reverse modeling approach for rapid tool shape optimization in die-sinking micro electro discharge machining. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 20(3), 031002. <https://doi.org/10.1115/1.4045956>
31. Natarajan, E., Kaviarasan, V., Lim, W. H., Tiang, S., & Tan, T. (2018). Enhanced multi-objective teaching-learning-based optimization for machining of Delrin. *IEEE Access*, 6, 51528-51546. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2869040>

© 2024 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/>).