



**Desarrollo Gemelo Digital para diseño de componentes mecánicos
manufacturados por CNC - Industria Aeroespacial Mexicana**
**Digital Twin Development for design of CNC manufactured mechanical
components in the Mexican Aerospace Industry**
**Desenvolvimento de Gêmeo Digital para o Projeto de Componentes
Mecânicos Manufacturados por CNC – Indústria Aeroespacial
Mexicana**

Jaime Roberto Castañeda Castañeda

Universidad IDESUM, México

Correo de correspondencia: mtajamecastaneda@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0822-8672>

Recibido: 21 de mayo de 2026

Aceptado: 27 de julio de 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.59722/synergia.v2i1.1278>

Resumen

En la industria aeroespacial mexicana, el maquinado de componentes metalmecánicos mediante tecnologías CNC (Control Numérico Computarizado) ha emergido como un elemento central en la competitividad y capacidad de producción. El análisis del estado actual revela un aprovechamiento limitado de herramientas avanzadas de simulación y optimización, que restringe la eficiencia y precisión de la manufactura. Las prácticas predominantes dependen de simulaciones CAM (*Computer Aided Manufacturing*) orientadas a la planificación de trayectorias de corte, se omite el comportamiento dinámico real de las máquinas-herramienta y la interacción material-herramienta durante el proceso de mecanizado, provocando un desfase entre las condiciones simuladas y los resultados reales. La ausencia de gemelos digitales integrales que cierren el ciclo “Diseño, Proceso y Desempeño”, la falta de una arquitectura de gemelo digital que combine CAD (*Computer Aided Design*), simulación dinámica de corte, datos operativos de



la máquina y modelos de inteligencia artificial explicable limita la capacidad de optimización integral del componente. La optimización paramétrica principalmente se realiza de manera empírica, basándose en la experiencia del operador o ingeniero, restringiendo la escalabilidad, trazabilidad y robustez de los procesos frente a variaciones de material, geometría o condiciones de corte. En este contexto, la incorporación de maquinados CNC con capacidades avanzadas representa una oportunidad tecnológica estratégica para la industria metalmecánica mexicana. Estas capacidades permiten el desarrollo de modelos predictivos más sofisticados, alimentados por inteligencia artificial y técnicas de *machine learning*, que optimizan parámetros de corte y predicen desempeño. La integración de CAM avanzada con análisis de dinámica de corte y modelos de IA explicable facilita un diseño de proceso basado en evidencia, disminuyendo la dependencia de la experiencia empírica y elevando la eficiencia de la manufactura. La adopción de gemelos digitales completos en la fabricación CNC habilita mejora continua de productos y procesos. Esto resulta particularmente crítico en el contexto aeroespacial.

Palabras clave: aeroespacial, herramienta mecánica, manufactura, industria mexicana, gemelo digital

Abstract

In the Mexican aerospace industry, the machining of metal-mechanical components through CNC (Computer Numerical Control) technologies has emerged as a central element in competitiveness and production capability. Analysis of the current state reveals limited use of advanced simulation and optimization tools, which constrains manufacturing efficiency and precision. Predominant practices rely on CAM (Computer Aided Manufacturing) simulations focused on cut path planning, while overlooking the actual dynamic behavior of machine tools and the material-tool interaction during the machining process, creating a gap between simulated conditions and real-world results. The absence of comprehensive digital twins capable of closing the “Design, Process, and Performance” loop, along with the lack of a digital twin architecture integrating CAD (Computer Aided Design), dynamic cutting simulation, machine operational data, and explainable artificial intelligence models, limits the capability for comprehensive component optimization. Parametric optimization is primarily carried out empirically, based on the experience of the operator or engineer, which restricts the scalability, traceability, and robustness of processes when facing variations in material, geometry, or cutting conditions. In this context, the incorporation of CNC machining with advanced capabilities represents a strategic technological opportunity for the Mexican metal-mechanical industry. These capabilities enable the development of more



sophisticated predictive models powered by artificial intelligence and machine learning techniques that optimize cutting parameters and predict performance. The integration of advanced CAM with cutting dynamics analysis and explainable AI models facilitates evidence based process design, reducing dependence on empirical experience and increasing manufacturing efficiency. The adoption of comprehensive digital twins in CNC manufacturing enables continuous improvement of products and processes. This becomes particularly critical within the aerospace context.

Keywords: aerospace, digital twin, machine tool, manufacturing, Mexican industry

Resumo

Na indústria aeroespacial mexicana, a usinagem de componentes metalomecânicos por meio de tecnologias CNC (Controle Numérico Computadorizado) emergiu como um elemento central na competitividade e na capacidade de produção. A análise do estado atual revela um aproveitamento limitado de ferramentas avançadas de simulação e otimização, o que restringe a eficiência e a precisão da manufatura. As práticas predominantes dependem de simulações CAM (Computer Aided Manufacturing) orientadas ao planejamento de trajetórias de corte, enquanto o comportamento dinâmico real das máquinas-ferramenta e a interação material-ferramenta durante o processo de usinagem são omitidos, provocando uma discrepância entre as condições simuladas e os resultados reais. A ausência de gêmeos digitais integrais que fechem o ciclo “Projeto, Processo e Desempenho”, bem como a falta de uma arquitetura de gêmeo digital que combine CAD (Computer Aided Design), simulação dinâmica de corte, dados operacionais da máquina e modelos de inteligência artificial explicável, limita a capacidade de otimização integral do componente. A otimização paramétrica é realizada principalmente de forma empírica, baseada na experiência do operador ou engenheiro, restringindo a escalabilidade, a rastreabilidade e a robustez dos processos diante de variações de material, geometria ou condições de corte. Nesse contexto, a incorporação de usinagem CNC com capacidades avançadas representa uma oportunidade tecnológica estratégica para a indústria metalomecânica mexicana. Essas capacidades permitem o desenvolvimento de modelos preditivos mais sofisticados, alimentados por inteligência artificial e técnicas de machine learning, que otimizam parâmetros de corte e preveem desempenho. A integração de CAM avançado com análise da dinâmica de corte e modelos de IA explicável facilita um projeto de processo baseado em evidências, reduzindo a dependência da experiência empírica e elevando a eficiência da manufatura. A adoção de gêmeos digitais completos na fabricação CNC possibilita a melhoria contínua de produtos e processos. Isso se torna particularmente crítico no contexto aeroespacial.



Palabras-chave: aeroespacial, herramienta mecánica, manufactura, industria mexicana, gêmeo digital

Introducción

La integración de tecnologías emergentes como la Planificación de Procesos Asistida por Computadora (CAPP), el Gemelo Digital (DT) y la Manufactura Inteligente (SM) está revolucionando el proceso de mecanizado al mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la capacidad de anticipar tendencias futuras en la manufactura (Afif y Sarhan, 2025).

Las inexactitudes geométricas en la configuración de la máquina y en las especificaciones de las piezas son una fuente importante de errores en el mecanizado CNC. Estas discrepancias han afectado durante mucho tiempo la calidad de los componentes fabricados y continúan siendo un área clave de investigación tanto en la academia como en la industria (Ahmed y Amorim, 2025).

La automatización es el proceso de crear los modelos sin usar una interfaz. Los modelos se pueden generar con un lenguaje de programación y con una API que se vincule al paquete CAD. La API Siemens NX Open se usa para la automatización, la cual registra los procedimientos con *journaling*. La API NX Open es un conjunto de rutinas que permite a los programas acceder al modelo de objetos y a los programas, interactuando con el modelo de objetos de NX. Con base en estas rutinas, se desarrollan algoritmos para automatizar la generación del modelo CAD (Anbalagan et al., 2021).

Los rápidos avances en la Inteligencia Artificial (IA) han brindado nuevas oportunidades para optimizar la tecnología de Control Numérico por Computadora (CNC), fundamental para el diseño mecánico, la manufactura y la automatización, explorando estrategias de optimización impulsadas por IA en sistemas CNC con el fin de mejorar la eficiencia del mecanizado, la calidad de la superficie, la vida útil de la herramienta y la estabilidad operativa general (Bai, 2025).

En 2013, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos mencionó explícitamente y utilizó de manera intercambiable los conceptos de Hilo Digital (*Digital Thread*) y Gemelo Digital (*Digital Twin*), destacando que estos poseen una memoria histórica y la capacidad de aprovechar conocimientos previos y actuales para obtener conciencia del estado y pronóstico del sistema, proporcionando así, la agilidad y capacidad de adaptación necesarias para un rápido desarrollo e implementación (Barricelli et al., 2019).

El Gemelo Digital se ha convertido en un tema de investigación de frontera en los últimos años y en una importante dirección de desarrollo para la manufactura inteligente. En el



mecanizado por control numérico (CNC), un sistema de Gemelo Digital puede utilizarse como un centro inteligente de monitoreo y análisis al reflejar el proceso real de mecanizado en un entorno virtual. La simulación del mecanizado es la tecnología clave para hacer posible este tipo de aplicación (Cao et al., 2020).

Como equipo clave en la industria manufacturera, las máquinas de Control Numérico por Computadora (CNC) necesitan satisfacer las crecientes demandas de la alta automatización, inteligencia e integración. Desde su introducción en 2003, el Gemelo Digital (DT) ha tenido amplias aplicaciones en diversas áreas, como el diseño de productos, el monitoreo de procesos, el control de calidad y el diagnóstico de fallas, un Gemelo Digital crea una réplica virtual del sistema físico mediante la integración de datos en tiempo real (Cao, 2025).

El desarrollo e implementación de una solución de monitoreo en tiempo real diseñada para máquinas CNC, habilita la solución a las máquinas en el ambiente industrial. Usamos la tecnología del Gemelo Digital (DT), el sistema integra una base de datos SQL (*Structured Query Language*) con interfaces Android y NET asegurando una sincronización fluida de los datos con las máquinas, así el sistema mejora los procesos de producción. El monitoreo en tiempo real permite reflejar de inmediato los cambios operativos, mejorando el mantenimiento predictivo y reduciendo el tiempo de inactividad de las máquinas (Daraba et al., 2024).

Los gemelos digitales con una descripción basada en habilidades están encontrando cada vez más aplicaciones en la producción industrial. Sus modelos vinculan las propiedades de un producto con las capacidades de proceso disponibles, las cuales son realizadas mediante las habilidades de los recursos. Un proceso de emparejamiento permite identificar recursos capaces de cubrir las necesidades existentes, de cualquier manera, aún falta la integración con programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y Manufactura Asistida por Computadora (CAM) (Dietrich et al., 2023).

Los Gemelos Digitales llegaron y cambiaron los sectores industriales, ya que crean una copia de los objetos del mundo real. Además, los Gemelos Digitales en el mecanizado, permiten observar, analizar y mejorar en tiempo real los resultados y procesos de producción, uniendo el mundo físico con el digital. Los operadores e ingenieros de la industria del mecanizado pueden utilizar Gemelos Digitales para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y mantener altos estándares de calidad (Dolli et al., 2024).

El proceso de manufactura híbrida combina preformas hechas con manufactura aditiva metálica y después las lleva a una estación CNC para maquinado. El proceso de manufactura

híbrida permite usar el material de manera óptima y, por ende, reducir desperdicio. El proceso de manufactura trae desafíos, los siguientes son algunos de ellos, localizar el sistema de coordenadas de trabajo, en generar trayectorias de herramienta y en mantener la estabilidad durante el fresado. En este caso, el desarrollo de un Gemelo Digital del proceso de maquinado ayuda a integrar modelos que predicen y mediciones del proceso, además de a escoger parámetros de corte que funcionan y a validar la geometría del componente a ser manufacturado (Dvorak et al., 2022).

La manufactura inteligente se ha convertido en una tendencia principal de la industria manufacturera, en el contexto de la Industria 4.0, la integración de las máquinas de fabricación físicas y sus contrapartes virtuales digitalizadas es impulsada por los conceptos y tecnologías emergentes del Gemelo Digital, con el objetivo de integrar de manera fluida el ciberespacio y el mundo físico mediante la construcción de un sistema de mapeo bidireccional, el Gemelo Digital puede mejorar significativamente la experiencia del usuario y la eficiencia de producción en la manufactura inteligente (Geng et al., 2022).

Las máquinas herramienta CNC, son los sistemas de manufactura, están integrados por componentes tales como, el husillo de velocidad, el servomotor multieje, el controlador y el proceso de mecanizado. El objetivo de las máquinas herramienta CNC es precisión y productividad en los procesos de mecanizado que responden a los factores del mismo ambiente, incluyendo el desgaste de la herramienta, las vibraciones por *chatter*, la deformación, el desgaste del husillo, el desgaste de los rodamientos, los problemas de los servomotores y el consumo de energía. Por lo tanto, el monitoreo continuo de su condición y estado es esencial para garantizar la precisión del mecanizado, la confiabilidad y la reducción de tiempos de inactividad (Hamza 2026).

Se observa que en el mecanizado con Control Numérico (NC) la trayectoria de la herramienta se define con datos dados, estos, influyen en la calidad del trabajo y en la velocidad de la producción. El sistema crea estos datos según las condiciones de corte, entonces, si los datos NC hacen que la carga de corte sea alta, la carga de corte alta acelera el desgaste de la herramienta y puede dañar la herramienta, por otro lado, si la carga de corte es baja, el tiempo de mecanizado se alarga y afecta la productividad. Los datos NC también pueden influir en la calidad de la superficie desde la perspectiva de la dinámica de corte, dependiendo de la combinación máquina, herramienta, material y herramienta de corte (Heo y Yoo, 2021).

En la fase de ingeniería de los sistemas de manufactura modernos, los métodos y las herramientas de simulación se han consolidado para enfrentar la exigencia de mayor eficiencia en el tiempo y mayor rentabilidad. Cuando se aplican esas soluciones de simulación, se crean gemelos digitales basados en modelos de simulación multidominio, los cuales, describen el comportamiento del sistema de manufactura. Durante el proceso de producción, surge un Gemelo Digital basado en datos en el contexto de Industria 4.0, impulsado por una mayor interconectividad y por nuevas tecnologías en la nube (Jaensch et al., 2018).

El Aprendizaje Automático (ML) y la Inteligencia Artificial (IA) han experimentado un aumento en su grado de aplicación asociado con la Industria 4.0. Su utilización efectiva se ha potenciado gracias a la disponibilidad de mayor capacidad computacional y a la digitalización de los procesos de producción, orientadas al desarrollo del Gemelo Digital (Jarosz y Ozel, 2021).

Por definición, un Gemelo Digital es una copia en la computadora de un producto que existe en el mundo real, esta copia guarda la información del producto y del proceso, el concepto nació en el campo de la gestión del ciclo de vida del producto. El Gemelo Digital se compone de tres elementos: un producto físico, una representación virtual de ese producto y las conexiones bidireccionales de datos que alimentan con información desde el entorno físico hacia la representación virtual, así como información y procesos desde la representación virtual hacia el entorno físico (Jones et al., 2020).

La industria manufacturera es un pilar fundamental de la economía nacional, del bienestar de la población y de la seguridad nacional. En particular, la profunda integración de la tecnología de manufactura con las tecnologías de la información y la comunicación, las tecnologías inteligentes y el conocimiento especializado relacionado con los productos están posibilitando una transformación revolucionaria en los modelos de manufactura, los métodos de producción y sus ecosistemas (Li et al., 2021).

Los sistemas de Control Numérico por Computadora (CNC) han cambiado de forma importante y consistente, son ahora herramientas clave para la manufactura moderna. Los sistemas de CNC permiten mecanizar con varios ejes y con alta precisión habilitando programar la automatización. Los avances recientes en la tecnología CNC se centran en los componentes clave del sistema, basados en interpoladores y controladores servo, técnicas de interpolación de alto orden y algoritmos avanzados de suavizado en cortes que mejoran la generación de trayectorias de herramienta y la calidad de la superficie, así como estrategias de control servo que optimizan el rendimiento de seguimiento y la respuesta dinámica (Lim et al., 2025).

El Gemelo Digital (*Digital Twin*, DT) es un concepto que forma parte de la Industria 4.0. La industria y la investigación usan el Gemelo Digital, aun así, la literatura científica no da una definición concreta de este. Las definiciones del concepto de DT en la literatura científica han cambiado, primero apareció en el campo aeroespacial, tiempo después se trasladó al dominio de la manufactura, hoy en día se estudia mucho en la Industria 4.0 y en la manufactura inteligente. El Gemelo Digital crea representaciones virtuales de los sistemas, mostrándolas a lo largo del ciclo de vida de los sistemas, de este modo, las optimizaciones y la toma de decisiones se basan en los mismos datos que se actualizan en tiempo real con el sistema físico, mediante una sincronización habilitada por sensores (Negri et al., 2017).

El procesamiento con máquinas-herramienta CNC es una parte importante del desarrollo actual de la modernización de la maquinaria. Para garantizar la precisión y la calidad estable del mecanizado por control numérico, la codificación del programa CNC debe validarse para evitar que, durante la ejecución del programa, se produzcan problemas como subcorte o colisiones. Por lo tanto, en el proceso de aplicación del mecanizado por Control Numérico, es necesario utilizar tecnología de gemelo digital para realizar simulaciones de mecanizado y de corte (Pan et al., 2020).

La arquitectura DTE (*Digital Twin Ecosystem*) integra la adquisición, el procesamiento y la sincronización de datos en tiempo real con la máquina CNC física. Nuestra arquitectura adopta y amplía la metodología utilizando dos componentes: el Componente de Adquisición, Procesamiento y Distribución de Datos (APDC) y el Componente de Representación Virtual (VRC), desarrollado utilizando la plataforma de desarrollo en tiempo real. El DTE modela con precisión el comportamiento de la máquina CNC bajo diversas condiciones de operación (Pantelidakis y Mykoniatis, 2024).

En los procesos de maquinado con máquinas-herramienta CNC, tanto los errores geométricos estáticos como los errores dinámicos influyen significativamente en la precisión final del componente mecanizado. La integración de modelos de Gemelo Digital con datos multisensoriales permite representar de manera fiel el comportamiento del sistema de manufactura y estimar en tiempo real la calidad del proceso. Este enfoque facilita el control cerrado de la precisión de maquinado y mejora la capacidad predictiva del sistema frente a desviaciones durante la operación (Sa et al., 2024).

Los Gemelos Digitales, como parte de la Industria 4.0, son fundamentales para los procesos avanzados de manufactura inteligente, incluido el mecanizado. Los sistemas de



sensores en la manufactura inteligente permiten el seguimiento en tiempo real de todos los cambios en el proceso de mecanizado, así como la simulación del comportamiento de un objeto en el mundo real. Además, pueden intervenir y corregir cualquier defecto que pueda surgir durante el proceso de mecanizado (Silva et al., 2025).

El Gemelo Digital de una tarea de mecanizado CNC puede optimizar el proceso, además ayuda tanto en la etapa de planificación como en la etapa de mecanizado. La calidad de un producto maquinado depende de la precisión y del acabado superficial al final de la etapa de mecanizado, que permite la simulación, predicción y optimización de los indicadores clave de desempeño (en este caso, el acabado superficial) durante la etapa de planificación del proceso y la etapa de mecanizado, utilizando datos de mecanizado históricos y en tiempo real, respectivamente (Vishnu et al., 2020).

El Gemelo Digital (*Digital Twin*) ha recibido una atención creciente, ya que ofrece una herramienta habilitadora para hacer realidad una manufactura impulsada digitalmente y habilitada por la nube. Dadas las dinámicas no lineales y la incertidumbre involucradas durante el proceso de degradación de la maquinaria, el diseño adecuado y la capacidad de adaptación de un modelo de Gemelo Digital continúan siendo un desafío (Wang et al., 2019).

El futuro del mecanizado se encuentra en la máquina herramienta totalmente autónoma, es necesario desarrollar nuevas tecnologías que puedan predecir, detectar y tomar decisiones inteligentes de manera independiente. Los Gemelos Digitales son un componente de este camino y ya están teniendo un impacto significativo en las industrias manufactureras, a pesar de ello, la implementación de Gemelos Digitales en el mecanizado ha sido lenta debido a la carga computacional que implica la simulación de las fuerzas de corte en línea (Ward et al., 2021).

El modelo de Gemelo Digital (DT) de una Máquina Herramienta de Control Numérico por Computadora (CNCMT) es un portador de datos complejos, acoplados y variables en el tiempo de la CNCMT, que teóricamente puede proporcionar un modelo de alta fidelidad y variable en el tiempo, sin embargo, todavía existen muchas dificultades en su proceso de implementación. El problema clave es cómo actualizar el modelo de DT teniendo en cuenta la atenuación del rendimiento y su validación (Wei et al., 2020).

El Mecanizado de Ultra Precisión (UPM) es un tipo de tecnología de procesamiento de alta exactitud desarrollada para satisfacer los requisitos de manufactura de productos de vanguardia de alta gama, incluyendo reactores de energía nuclear, circuitos integrados de gran



escala, láseres y aeronaves. El fenómeno de asimetría de información está ampliamente presente en el diseño y control del mecanizado de ultra precisión (Wu et al., 2021).

La precisión de una máquina, de un equipo o de un sistema se va degradando con el tiempo, cuando llega a un punto importante, suelen aparecer las fallas o el mal funcionamiento. En el sector militar, en el sector aeroespacial y en otros sectores, una falla inesperada de los componentes de transmisión puede generar las pérdidas económicas, puede generar los daños al medio ambiente y puede generar la pérdida de vidas humanas, este hecho puede producir consecuencias catastróficas.

Si es posible detectar condiciones anormales a tiempo, con base en los datos de monitoreo y en los resultados de simulaciones predictivas durante las etapas iniciales de degradación del desempeño y utilizar esta información como fundamento para el mantenimiento del sistema, se podrá garantizar la eficiencia, seguridad y confiabilidad (Yang et al., 2022).

En la era industrial, el equipo de producción funciona como una máquina madre esencial, en la industria manufacturera global, los componentes como computadoras portátiles, teléfonos móviles y piezas automotrices buscan todo un diseño estético.

La industria de máquinas herramienta de Taiwán desempeña un papel significativo a nivel mundial, frente a un entorno de mercado en constante cambio, el desarrollo y la ventaja competitiva de las máquinas CNC son temas cruciales para los fabricantes (Yao et al., 2024).

La gestión efectiva de la deformación durante el fresado de una pieza de paredes delgadas mejorará significativamente su calidad, lo cual, sin embargo, sigue siendo difícil de alcanzar debido a la falta de un método de percepción, optimización y control de deformación en tiempo real, para cubrir esta brecha, se propone un nuevo método de control óptimo en línea de la deformación durante el fresado de piezas de paredes delgadas, incorporando Gemelos Digitales en el proceso de fresado de estas piezas (Zhang et al., 2022).

El concepto de Gemelo Digital ha sido aceptado por un número cada vez mayor de investigadores y empresas, se han reportado numerosas aplicaciones de los sistemas de Gemelos Digitales, como el monitoreo del estado de aviones y la fábrica inteligente, además es una medida importante para lograr la manufactura inteligente y la Industria 4.0, así el avance de los sistemas DT en el entorno manufacturero se torna evidente (Zhao et al., 2019).

En comparación con las máquinas CNC tradicionales, el fresado con robots presenta las ventajas de bajo costo, alta flexibilidad y gran adaptabilidad, ofreciendo una nueva solución para el mecanizado de superficies complejas, una limitante identificada es, que la planificación de la

trayectoria de mecanizado de robots en el mundo real es consumidora de tiempo y conlleva riesgos de seguridad, al mismo tiempo, lograr un monitoreo con visualización 3D efectivo durante el proceso de fresado también representa un problema altamente desafiante (Zhu et al., 2023).

La deformación por manufactura hace que las piezas sean defectuosas, que se desperdicie materia prima, al igual que tiempo de mecanizado, lo cual, reduce la eficiencia del proceso. Actualmente, el tiempo de desarrollo de la fabricación se ha reducido por las mejoras en los sistemas CAD/CAM, aun así, en la fase de prueba de mecanizado, los operadores cambian la forma de sujetar la pieza y los ajustes de la máquina, con lo cual mejoran las trayectorias de las herramientas en cada prueba para lograr la calidad que necesita la producción masiva (Zhu et al., 2021).

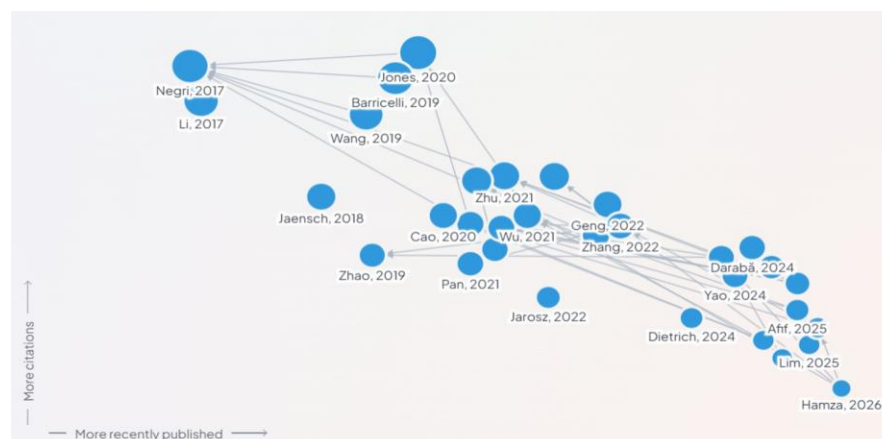
Método de búsqueda y selección (transparencia)

Este manuscrito se lleva a cabo mediante la utilización de ResearchRabbit y Zotero, las cuales son fuentes solidas de investigación y facilitadoras de gestión de información, apoyando la recolección de datos filtrando por palabras clave: sostenibilidad, economía circular, integración económica; Fecha de publicación: años 2016 - 2026; Cuartil de publicación: artículos publicados en el Q1; Acceso abierto y Journal H-Index 500-1500.

Basado en los datos recabados, se cubre el objetivo de identificar la necesidad y las ventajas de la creación, fortalecimiento e implementación en tiempo y forma de esta herramienta o conjunto de ellas, conocidas como gemelos digitales. La conexión entre los manuscritos se muestra en la figura 1.

Figura 1

Relación entre los manuscritos seleccionados con el tema de gemelos digitales



Nota. Elaboración con datos obtenidos mediante *ResearchRabbit*.

Desarrollo - Síntesis temática

La evolución tecnológica en los procesos de manufactura ha redefinido el papel del mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado) dentro de los sistemas productivos contemporáneos. Lo que anteriormente se concebía como una operación mecánica y relativamente aislada, ha transitado hacia esquemas de operación altamente interconectados, la integración de capacidades digitales, control avanzado y gestión de datos ha ampliado el alcance funcional de estas plataformas de mecanizado.

Por eso, el mecanizado CNC forma hoy parte de los entornos de manufactura complejos y se apoya en las plataformas de mecanizado. La evolución de la manufactura hacia la industria 4.0 ha cambiado el mecanizado CNC que antes era un proceso mecánico aislado a formar parte de un sistema ciberfísico integrado (Ahmed y Amorim, 2025).

El uso de los Gemelos Digitales (*digital twins*) mejora la calidad, predice los errores geométricos y automatiza las cadenas de herramientas con modelos que combinan habilidades, impulsando la evolución de la manufactura avanzada (Ahmed y Amorim, 2025; Dietrich et al., 2023; Vishnu et al., 2020). Actualmente está comprobado cómo la innovación colectiva y el manejo ético de los datos definen la competitividad regional y el aprendizaje organizacional a partir del error (Dvorak et al., 2022; Pan et al., 2020).

En la fabricación, la innovación ya no se queda en mejorar una máquina, sino que esta mejora, forma parte de un conjunto de procesos que trabajan en combinación.

Las plataformas CAD/CAM conectan sistemas que hacen que las operaciones se coordinen, en este contexto, las decisiones no hacen los sistemas independientes, entonces, el especialista sigue tomando decisiones, el planificador de procesos y el operador de máquina continúan dentro del ciclo de control y retroalimentación por ciclos la información de los Gemelos Digitales.

También la visión de la manufactura que combina las diversas habilidades involucradas en esta tecnología dice que la innovación nace al organizar los servicios digitales en la cadena de valor, con esa lógica la ciencia de materiales, la cinemática de la máquina, las herramientas y los algoritmos de aprendizaje automático, trabajan en conjunto para que la producción de los componentes personalizados y complejos sea más eficiente.

La innovación en la manufactura es entonces ahora un trabajo en equipo, el cual se organiza con los modelos de Producto, Proceso y Recurso (PPR), estos modelos organizan la manufactura, los servicios de diseño asistido por computadora (CAD) y los servicios de

fabricación asistida por computadora (CAM), todos ellos se integran bajo arquitecturas que permiten acceso necesario para esta interacción (Dietrich et al., 2023).

En la figura 2 se muestra el ciclo PPR con las principales variables que lo componen.

Figura 2

El ciclo PPR – Producto, Proceso y Recurso



Nota. Elaboración de la ilustración mediante *Notebook LM*.

La colaboración ocurre entre los sistemas de software y el medio ambiente del mundo real, mantiene al ser humano en el hilo, entonces el planificador de procesos y el operador de la máquina toman decisiones, usando la retroalimentación del Gemelo Digital (Vishnu et al., 2020).

El enfoque de manufactura basada en habilidades combinadas muestra que la innovación aparece cuando la empresa tiene la capacidad de orquestar los diferentes servicios tecnológicos dentro de la cadena de valor unificada (Dietrich et al., 2023).

En este contexto, la innovación en conjunto obliga al conocimiento de los materiales, al conocimiento de las cinemáticas de las máquinas y al conocimiento de los algoritmos de aprendizaje automático a unirse, con el objetivo común de producir piezas a medida de manera rápida, efectiva y constante (Dietrich et al., 2023; Vishnu et al., 2020).



En los ecosistemas y en la competitividad regional, el sector de la máquina-herramienta ha cambiado, se observa, que el consumo subió de 60 mil millones de dólares en 2019 a 110 mil millones de dólares en 2024. El consumo muestra un giro hacia mercados como América del Norte, los ecosistemas que cambian se sostienen con el uso de tecnologías de ultra precisión, estas tecnologías permiten a las industrias del país competir en sectores de valor como el aeroespacial, la óptica y los semiconductores (Ahmed & Amorim, 2025).

En los entornos de manufactura avanzada, la competitividad industrial no depende solo de la incorporación de la maquinaria de vanguardia. La competitividad también depende de la implementación del software que compensa los errores, el software mejora la precisión del proceso, prolonga la vida operativa de los equipos existentes y dirige un mejor factor de costo-beneficio, procurando y manteniendo una alta calidad en los productos. El software ayuda a ahorrar dinero y a reducir los tiempos muertos, la vida operativa de los equipos se alarga cuando el software controla los fallos y al mismo tiempo, la unión de las infraestructuras de computación en la nube permite crear las arquitecturas de producción que pueden adaptarse a las necesidades de la industria. Las plantas regionales pueden responder más rápido a los escenarios de demanda los cuales son altamente dinámicos y cambian rápidamente.

Sin embargo, el desarrollo de gemelos digitales con modelos de aprendizaje automático aun enfrenta problemas altamente relevantes en cuanto a la calidad, la consistencia y la representatividad del dato que se usa para entrenar. El desarrollo necesita datos de calidad, entonces la validación de las fuentes es clave, esta validación combina el registro de mecanizado con el dato de operación en tiempo real, dando lugar así a la fuente de la verdad que ayuda a mantener la trazabilidad y la confiabilidad del conocimiento digital durante el ciclo de vida del producto.

La competitividad no depende solo de adquirir hardware caro, también depende de la capacidad de aplicar estrategias de compensación de errores con software, integrar las estrategias de compensación de errores, lo que conduce a que el equipo presente una mayor vida útil (Ahmed & Amorim, 2025).

La integración de la nube y del borde permite que las plantas de fabricación de la región sean más ágiles y que así, se adapten de mejor forma a la volatilidad del mercado (Dietrich et al., 2023).

La construcción de los modelos de datos para los Gemelos Digitales necesita cuidado y mantenimiento, si esto se hace de forma deficiente, los modelos basados en el aprendizaje

automático (ML), pueden enfrentar problemas de integridad y de representatividad de la información (Ahmed & Amorim, 2025; Vishnu et al., 2020).

El cribado de fuentes es vital; por ejemplo, el uso de datos históricos de mecanizado debe complementarse con datos en tiempo real para evitar modelos sesgados que no consideren el desgaste de la herramienta (Vishnu et al., 2020).

La ética en los datos también está vinculada a la gestión de una *Single Source of Truth* (SSOT), su correcta gestión, asegura que la trazabilidad del producto no se altere durante su ciclo de vida (Dietrich et al., 2023).

En los sistemas CNC, la incorporación de los modelos de predicción basados en el aprendizaje automático se ha vuelto una forma de identificar a buen tiempo las desviaciones en la forma y de optimizar la precisión de la pieza durante el proceso de manufactura, con el análisis de los datos de mecanizado, con las variables de proceso y con la información técnica que proviene de los sensores, los modelos identifican los patrones que están ligados a los errores que se repiten y a los errores que aparecen al azar en la cinemática de la máquina-herramienta. Los modelos ayudan a mejorar la calidad, la integración de los algoritmos de aprendizaje supervisado y de las técnicas de regresión permite crear los modelos que estiman las desviaciones de forma en tiempo casi sin demoras, los esquemas de compensación ajustan la trayectoria de la herramienta y los parámetros de control usando los modelos y los algoritmos.

Desde el punto de vista de la ingeniería de manufactura, el enfoque cambia la forma de corregir errores y lo convierte en un problema de inferencia con datos, entonces la calidad del modelo depende mucho de que el conjunto de entrenamiento represente bien el proceso, por esto, la incorporación de datos de operación en línea permite que los modelos que predicen se actualicen constantemente, los modelos de predicción capturan los efectos del desgaste de la herramienta y las especificaciones de las máquinas, con la sinergia entre la analítica de datos y el control de procesos es un paso para crear arquitecturas de manufactura que usan los Gemelos Digitales y que funcionan en formato de datos, los desarrollos entonces, hacen que la estabilidad del proceso de mecanizado mejore, que el desperdicio se reduzca y que la producción de los componentes de alta precisión alcance tolerancias más cerradas.

Los modelos predictivos requieren conjuntos de datos con una cobertura más completa de todos los parámetros que influyen en la calidad superficial, esto es un punto crítico identificado actualmente (Vishnu et al., 2020).



El uso del protocolo ligero MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) permite transferir datos grandes desde los sensores, el manejo claro de este protocolo evita fallos de procesamiento por datos incorrectos, con la validación de los datos como obligación ética se evitan accidentes de procesamiento que pueden dañar al equipo y al personal (Pan et al., 2020).

La visualización en los gemelos digitales ha evolucionado de ser una simple representación gráfica a una herramienta de diagnóstico que permite aprender del error antes de que este ocurra físicamente, el análisis crítico de los errores geométricos (como los errores de posición, rectitud y rotación) a través de mapas de estabilidad y Funciones de Respuesta de Frecuencia (FRF) transforma el fallo potencial en una oportunidad de ajuste proactivo (Ahmed & Amorim, 2025; Dvorak et al., 2022).

La visualización muestra las desviaciones superficiales entre el escaneo de la pieza final y el modelo CAD (*Cad Aided Design*) original con esta visualización se cierra el ciclo de aprendizaje (Dvorak et al., 2022). Este proceso de aprendizaje continuo hace que el modelo de datos sea más fuerte con el tiempo, reduciendo la incertidumbre cuando aparecen nuevas condiciones de mecanizado (Vishnu et al., 2020).

Las simulaciones de corte en tiempo real muestran el proceso dentro de “carcasas de máquinas transparentes” virtuales, además son capaces de identificar colisiones y problemas de subcorte (Pan et al., 2020).

Tenemos la necesidad de crear gemelos digitales con datos que permiten predecir la rugosidad superficial (R_a) y compensar los errores cinemáticos (Ahmed & Amorim, 2025; Vishnu et al., 2020). Los modelos ofrecen soluciones usando registros temporales confiables, algunos usan escaneo de luz estructurada con esos métodos los modelos pueden alinear los sistemas de coordenadas en la manufactura híbrida (Dvorak et al., 2022).

Se presenta la *Asset Administration Shell* como el estándar que permite la interoperabilidad de los modelos y los equipos (Dietrich et al., 2023).

En la práctica industrial actual, muchos modelos de compensación de errores en máquinas CNC han sido desarrollados con un alto grado de especialización, ajustándose a configuraciones cinemáticas particulares, condiciones operativas específicas e incluso a un equipo individual dentro de una planta. Si bien estos enfoques permiten obtener mejoras locales significativas en la precisión geométrica, su aplicabilidad resulta altamente limitada si se pretende transferir el conocimiento hacia otras máquinas, plataformas o entornos productivos. Esta fragmentación metodológica dificulta la escalabilidad de las estrategias de compensación y limita

que los procesos de mecanizado generen el conocimiento al ritmo deseado, aun así, los procesos de mecanizado estandarizan el conocimiento y se facilita el uso del conocimiento en los procesos de manufactura.

Desde la investigación en manufactura se necesita pasar a modelos que se puedan aplicar a más casos. Los modelos deben mostrar cómo se relacionan la cinemática de la máquina-herramienta, las condiciones de proceso y los errores geométricos, esta integración de aprendizaje automático y de modelado híbrido físico-estadístico permite encontrar patrones que aparecen entre arquitecturas de máquinas.

Bajo este paradigma, los modelos no solo describen el comportamiento del equipo, también pueden adaptarse usando técnicas de transferencia de aprendizaje o recalibración paso a paso, por lo tanto, la evolución hacia marcos de compensación que busquen alcanzar un mayor número de beneficiarios, son la clave para mejorar la interoperabilidad entre sistemas reduciendo el tiempo de puesta en marcha y fortaleciendo la adopción de las estrategias de fabricación que usan datos en los entornos de la industria.

Los modelos de compensación son muy específicos para una configuración de máquina, y por eso los modelos de compensación no se pueden aplicar en todas partes, su implementación en el hardware para compensación en tiempo real sigue costando mucho y presenta problemas de compatibilidad (Ahmed & Amorim, 2025).

La calidad del conjunto de datos inicial es muy importante ya que, si las condiciones cambian respecto al entrenamiento, los resultados pueden tener errores críticos (Vishnu et al., 2020).

Necesitamos crear los modelos de error que funcionen en los diferentes tipos de máquinas usando la inteligencia artificial transferible. La intención es integrar los sensores cuánticos para medir con alta precisión y mejorar los algoritmos de suavizado de las trayectorias (Ahmed & Amorim, 2025).

Al final, se sugiere que se priorice la estandarización internacional de los submodelos de los Gemelos Digitales y de sus submodelos, así facilitar la colaboración global (Dietrich et al., 2023).

Los gemelos digitales son la base de la manufactura, la capacidad de convertir el error detectado en visualizaciones permite pasar de la reacción a la optimización (Ahmed & Amorim, 2025; Pan et al., 2020).



Fomentar la innovación colectiva y asegurar el cribado ético de datos ayuda a las regiones, ya que habilitan a mejorar de manera contundente su competitividad en el mercado global (Ahmed & Amorim, 2025; Dietrich et al., 2023).

Vacíos, tendencias y agenda futura

La transición del mecanizado CNC a los esquemas de la Industria 4.0 cambia el entorno de la industria de la aviación y del espacio en regiones como Querétaro y en Chihuahua. En esas regiones la manufactura de precisión es un punto clave para el desarrollo de la economía.

Desde esa visión la incorporación de los gemelos de datos (*digital twins*) no es solo una actualización de tecnología, sino un cambio de paradigma.

El cambio lleva del taller que solo responde al sistema que combina la cibernética y lo de la física, al sistema que predice, compensa y aprende todo el tiempo.

Los hallazgos muestran que la innovación ya no depende de mejorar una sola máquina-herramienta. La innovación depende de la integración por medio de los modelos de Producto, Proceso y Recurso (PPR).

En el trabajo profesional, el CAD/CAM, los sensores en tiempo real, los modelos cinemáticos y los algoritmos de aprendizaje automático se combinan. La persona que ha trabajado durante décadas ajustando los parámetros de corte, corrigiendo las desviaciones geométricas y compensando el desgaste de las herramientas con la experiencia práctica, encuentran en el gemelo digital una herramienta práctica para traducir formalmente la matemática del conocimiento tácito, traduciéndolo a datos y ecuaciones.

La predicción de la rugosidad de la superficie (R_a), el mapeo de errores de posición o rectitud con Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF) y la visualización de comparación entre escaneo 3D y modelo CAD permiten cerrar el ciclo de retroalimentación con detalle que antes no se podía lograr.

Los hallazgos aplican directamente la optimización de tolerancias de la industria de la aviación y el espacio aplicando la reducción de desperdicio y la validación de datos sin necesidad de pruebas físicas antes de la ejecución real.

En la competitividad regional, las implicaciones afectan la estrategia, Querétaro y Chihuahua han creado clústeres aeroespaciales con las cadenas de suministro conectadas, aun así, el factor que diferencia a los competidores ya no está solo en la capacidad instalada ni en la compra de los centros de maquinado multi ejes, entran en juego ahora, factores como la



compensación de errores con el software y la gestión de datos, estos pueden alargar la vida útil del equipo y pueden subir su desempeño a niveles de ultra precisión sin inversiones muy altas.

En un entorno donde los contratos aeroespaciales exigen trazabilidad total y cumplimiento estricto de la normativa, estos contratos necesitan la implementación de una única fuente de verdad y la interoperabilidad con los estándares como la *Asset Administration Shell* aumenta la confianza en la cadena de valor de la región, estos estándares habilitan que las regiones se conviertan en maquiladoras, a su vez, en los nodos de ingeniería que ofrecen la manufactura y la certificación a nivel global.

Además, la integración nube-borde da a las plantas regionales la agilidad que necesitan para enfrentar la volatilidad del mercado internacional, ajustar los modelos predictivos cuando aparecen nuevas aleaciones de materiales o herramientas, cuando cambian los diseños o cuando hay variaciones en lotes pequeños.

Esa capacidad es importante en un sector donde la producción es de bajo volumen y la complejidad es mucha.

Desde el piso de producción, los operarios ven que hay que pasar de hacer ajustes correctivos después del proceso a usar estrategias proactivas que se basan en simulación y en análisis de datos en tiempo real. Los operarios reducen los tiempos muertos y disminuyen los riesgos de colisión o de subcorte.

El análisis trata de la ética y del cribado de los datos es crucial en la manufactura aeroespacial, si el equipo entrena el modelo con datos que están incompletos o que están sesgados pueden generarse compensaciones equivocadas, lo que puede tener un valor alto económicamente o peor aún pueden ser altamente peligrosas.

El equipo valida técnicamente los datos que vienen de los sensores, usa de forma clara los protocolos como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), cubriendo todos los parámetros que influyen en la calidad superficial. Las prácticas técnicas son también requisitos éticos para la competitividad regional, así pues, se debe establecer la gobernanza de datos y la cultura de validación en las Universidades, en los Centros de Investigación y en las Empresas del clúster.

Los aprendizajes pueden pasar a sectores como el automotriz, los dispositivos médicos y la energía. Los equipos replican la lógica de la innovación en grupo, la estandarización de los submodelos en formato de datos y el aprendizaje de la organización basado en el error en las industrias donde la precisión y la trazabilidad son requisitos.

En la figura 3 se ilustra el funcionamiento esperado de un gemelo digital, junto con sus elementos principales.

Figura 3

Integración de gemelos digitales en el ecosistema de producción



Nota. Elaboración de la ilustración mediante *Notebook LM*.

El principio es: convertir el error en conocimiento con estructura usando visualización y modelos de predicción, entonces por medio de los Gemelos Digitales, se mejora cada proceso y también unen los sistemas de cada región. Los Gemelos Digitales hacen que los sistemas de cada región compitan en los mercados del mundo con la inteligencia de fabricación y la colaboración de tecnología.

Conclusiones

La evolución del mecanizado CNC hacia los entornos ciberfísicos ha demostrado que los Gemelos Digitales son hoy el eje que conecta la manufactura. Los Gemelos Digitales aportan más que la simulación del proceso, integran los datos, los modelos de la física y los algoritmos de aprendizaje automático para transformar el error en una fuente de conocimiento, además convierten el error en una fuente de conocimiento, esta transición significa cambiar de una lógica



correctiva a una arquitectura predictiva, así los equipos usan variables tales como la compensación de errores geométricos, la predicción de rugosidad superficial y la validación virtual de trayectorias a manera de prácticas sistemáticas y ya no como ajustes empíricos aislados.

El enfoque Producto, Proceso y Recurso (PPR) consolida la innovación colectiva como un marco que integra la innovación. La manufactura basada en habilidades muestra que la competitividad ya no depende solo de lo confiable que sea la máquina-herramienta, ahora depende también, de la capacidad para organizar los servicios digitales para que trabajen juntos, entonces la incorporación de estándares como la *Asset Administration Shell* refuerza la interoperabilidad y sienta las bases para crear los ecosistemas industriales de colaboración, en este contexto, el operador y el planificador de procesos tienen un papel dentro del *human in the loop*, validando los modelos, a su vez, los robustecen con criterio y experiencia real.

Otro aporte importante es formalizar el aprendizaje de la organización a partir del error, la visualización mediante simulaciones en tiempo real, mapas de estabilidad y análisis de respuesta convierte desviaciones de forma y vibración en datos para mejorar continuamente. El enfoque reduce la incertidumbre cuando se trabaja con nuevas condiciones de mecanizado y ayuda a fortalecer paso a paso los modelos de predicción, así, el Gemelo Digital ya no es un espejo estático del proceso, más bien se vuelve un sistema que se adapta y cambia con cada iteración productiva.

El proceso de cribado y creación de bases de datos es una parte importante de esta arquitectura. La calidad, la representatividad y la trazabilidad de los datos hacen que el modelo sea confiable, entonces, depende mucho de los conjuntos de entrenamiento y muestra que un modelo predictivo es tan fuerte como la diversidad y la precisión de los datos que lo alimentan. Integrar los datos históricos con las mediciones en tiempo real y validar las señales de los sensores mejora la exactitud del algoritmo previene fallos operativos y reduce los riesgos físicos, además la ética en la gestión de los datos, sobre todo al consolidar una única fuente de verdad, es un requisito técnico y organizacional que no se puede evitar.

Existen limitaciones que guían la investigación futura, los modelos de compensación están especializados para configuraciones de máquina y la especialización limita la escalabilidad. Necesitamos modelos de error con inteligencia artificial que se pueda transferir, modelos que puedan adaptarse a topologías sin perder la precisión, entonces, reforzamos la integración de los



sensores de ultra precisión y desarrollamos algoritmos de suavizado de las trayectorias para reducir las excitaciones en los entornos de alta velocidad.

Otra línea estratégica está en la estandarización internacional de los submodelos de los Gemelos Digitales. Si no hay marcos normativos comunes y sólidos, la colaboración global y la interoperabilidad seguirán siendo parciales. Paralelamente a la convergencia entre la infraestructura de la nube y el borde de datos, los protocolos ligeros de comunicación demandan investigación en la ciberseguridad industrial, es necesario investigar la resiliencia de los datos para garantizar la continuidad operativa en los sistemas conectados.

El mensaje es claro: la transformación digital en la manufactura no es solo comprar tecnología, es gobernar el conocimiento, cuando la empresa compra equipos y tecnologías sin unirlos con una arquitectura de datos y sin validar con procesos éticos, crea sistemas frágiles y modelos poco confiables, entonces puede perderse la ventaja competitiva sostenible, la cual llega solo a las organizaciones que son capaces de integrar precisión técnica, interoperabilidad digital y aprendizaje continuo, esta situación solo puede ser posible cuando la tecnología, los datos y el criterio humano están en equilibrio, así se define el alcance de la manufactura inteligente.

Declaración de conflicto de intereses y financiación

El artículo *Desarrollo Gemelo Digital para diseño de componentes mecánicos manufacturados por CNC - Industria Aeroespacial Mexicana* no presenta conflictos de intereses con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados del proyecto.

Declaración sobre el uso de herramientas de inteligencia artificial

La creación de este manuscrito se apoya en herramientas de IA tales como, Research Rabbit, Zotero, Chat GPT y Notebook LM.

Referencias

- Afif, M. F. y Sarhan, A. A. D. (2025). *Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: Interconnections and integration in CNC machining processes*. International Journal of Production Research, 63(24), 9593–9632.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2521717>



- Ahmed, Y. S. y Amorim, F. L. (2025). *Advances in computer numerical control geometric error compensation: Integrating AI and on-machine technologies for ultra-precision manufacturing*. *Machines*, 13(2), 140. <https://doi.org/10.3390/machines13020140>
- Anbalagan, A., Shivakrishna, B. y Srikanth, K. S. (2021). *A digital twin study for immediate design/redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation*. *Materials Today: Proceedings*, 46(17), 8209–8217. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.209>
- Bai, Z. (2025). *Enhancing mechanical design, manufacturing, and automation through AI-based computer numerical control (CNC) optimization*. *Revista Gestão & Tecnologia*, 25(2), 74–89. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2025.v25i2.3164>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). *A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications*. *IEEE Access*, 7, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Cao, X., Zhao, G. y Xiao, W. (2020). *Digital twin-oriented real-time cutting simulation for intelligent computer numerical control machining*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(1–2), 5–15. <https://doi.org/10.1177/0954405420937869>
- Cao, Y. (2025). *Multisensor data fusion-driven digital twins in computer numerical control machining: A review*. *Machines*, 13(10), 921. <https://doi.org/10.3390/machines13100921>
- Daraba, D., Pop, F. y Daraba, C. (2024). *Digital twin used in real-time monitoring of operations performed on CNC technological equipment*. *Applied Sciences*, 14(22), 10088. <https://doi.org/10.3390/app142210088>
- Dietrich, D., Neubauer, M., Lechler, A. y Verl, A. (2023). *Automated manufacturing toolchain using skill-based digital twins*. *Procedia CIRP*, 128, 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.06.045>
- Dolli, V., Jally, S.V., Rawal, Y., Madhusudhana, H. K., Satish, G. J. y Lakkundi, A. R. (2024). *A review on tool condition monitoring in CNC turning process using digital twin technology*. *AIP conference proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0291701>
- Dvorak, J., Cornelius, A., Corson, G., Zamoski, R., Jacobs, L., Penney, J. y Schmitz, T. (2022). *A machining digital twin for hybrid manufacturing*. *Manufacturing Letters*, 33, 786–793. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.097>
- Geng, R., Li, M., Hu, Z., Han, Z. y Zheng, R. (2022). *Digital twin in smart manufacturing: Remote control and virtual machining using VR and AR technologies*. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(11), Article 321. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03426-3>



- Hamza, M. F. (2026). *Cloud, Edge, and Digital Twin Architectures for Condition Monitoring of Computer Numerical Control Machine Tools: A Systematic Review*. Information, 17, 153. <https://doi.org/10.3390/info17020153>
- Heo, E. y Yoo, N. (2021). *Numerical control machine optimization technologies through analysis of machining history data using digital twin*. Applied Sciences, 11(7), 3259. <https://doi.org/10.3390/app11073259>
- Jaensch, F., Csiszar, A., Scheifele, C. y Verl, A. (2018). *Digital twins of manufacturing systems as a base for machine learning*. In 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2018.8600844>
- Jarosz, K. y Ozel, T. (2021). *Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems*. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 15(2–3), 127–148. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2022.124922>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Li, B., Hou, B., Yu, W., Lu, X., & Yang, C. (2021). *Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review*. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 18(1), 86–96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
- Lim, J.-M., Song, W., Lee, J.-S., Park, J.-M., Shin, H.-R., Oh, I., Hwang, S.-H., Jeong, S., Kang, S., Lee, C.-Y. y Min, B.-K. (2025). *Recent advances in CNC technology: Toward autonomous and sustainable manufacturing*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 26(9), 2311–2344. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01334-2>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). *A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems*. Procedia Manufacturing, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Pan, L., Guo, X., Luan, Y. y Wang, H. (2020). *Design and realization of cutting simulation function of digital twin system of CNC machine tool*. Procedia Computer Science, 183, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.057>
- Pantelidakis, M. y Mykoniatis, K. (2024). *Extending the digital twin ecosystem: A real-time digital twin of a LinuxCNC-controlled subtractive manufacturing machine*. Journal of Manufacturing Systems, 74, 1057–1066. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.012>
- Sa, G., Sun, J., Hou, M., Zhengyang, J., Liu, Z., Mao, H., Huang, K., He, L. y Tan, J. (2024). *A digital twin synchronous evolution method of CNC machine tools associated with dynamic*



- and static errors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134(5–6), 2753–2763. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14244-W>
- Silva, L. R. R., Pimenov, D. Y., Silva, R. B., Ercetin, A. y Giasin, K. (2025). *Review of applications of digital twins and Industry 4.0 for machining*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 9(7), 211. <https://doi.org/10.3390/jmmp9070211>
- Vishnu, V. S., Varghese, K. G. y Gurumoorthy, B. (2020). *A data-driven digital twin of CNC machining processes for predicting surface roughness*. Procedia CIRP, 104, 1065–1070. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.179>
- Wang, J., Ye, L., Gao, R.X., Li, C., & Zhang, L. (2019). *Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing*. International Journal of Production Research, 57, 3920–3934. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552032>
- Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J., Ojo, S., Ayvar-Soberanis, S., Curtis, D. y Ozturk, E. (2021). *Machining digital twin using real-time model-based simulations and lookahead function for closed loop machining control*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(11–12), 3615–3629. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-W>
- Wei, Y., Hu, T., Zhou, T., Ye, Y. y Luo, W. (2020). *Consistency retention method for CNC machine tool digital twin model*. Journal of Manufacturing Systems, 58, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.002>
- Wu, L., Leng, J. y Ju, B.-F. (2021). *Digital twins-based smart design and control of ultra-precision machining: A review*. Symmetry, 13(9), 1717. <https://doi.org/10.3390/sym13091717>
- Yang, X., Ran, Y., Zhang, G., Wang, H., Mu, Z., & Zhi, S. (2022). *A digital twin-driven hybrid approach for the prediction of performance degradation in transmission unit of CNC machine tool*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 73, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102230>
- Yao, K.-C., Chen, D.-C., Pan, C.-H. y Lin, C.-L. (2024). *The development trends of computer numerical control (CNC) machine tool technology*. Mathematics, 12(13), 1923. <https://doi.org/10.3390/math12131923>
- Zhang, C., Zhou, G., Xu, Q., Wei, Z., Chong, H., y Wang, Z. (2022). *A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124(7–8), 2847–2861. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10667-5>
- Zhao, G., Cao, X., Xiao, W., Zhu, Y. y Cheng, K. (2019). *Digital twin for NC machining using complete process information expressed by STEP-NC standard*. En Proceedings of the



4th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE 2019) (pp. 1–6). ACM. <https://doi.org/10.1145/3351917.3351979>

Zhu, Z., Lin, Z., Huang, J., Li, Z. y He, B. (2023). A digital twin-based machining motion simulation and visualization monitoring system for milling robot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(9-10), 4387–4399. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11827-X>

Zhu, Z., Xi, X., Xu, X., & Cai, Y. (2021). *Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing*. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 453–466. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.015>