

Soft metrología en analítica de datos e inteligencia artificial para la gestión de calidad manufacturera¹

Soft metrology in data analytics and artificial intelligence for quality management in manufacturing

Metrologia suave na análise de dados e inteligência artificial para a gestão da qualidade do fabrico

<https://doi.org/10.15332/24631140.10087>

Artículo de revisión

Isabel Cristina Uribe-Posada²

Edilson Delgado-Trejos³

Recibido: 8 de Febrero del 2024

Revisado: 17 de mayo del 2024

Aceptado: 11 Junio del 2024

Citar como:

Uribe-Posada, I. C., & Delgado-Trejos, E. (2024). Soft metrología en analítica de datos e inteligencia artificial para la gestión de calidad manufacturera. *SIGNOS - Investigación En Sistemas De gestión*, 16(2), 259-273. <https://doi.org/10.15332/24631140.10087>



Resumen

El objetivo de esta investigación es realizar una revisión exhaustiva del estado del arte sobre estrategias que combinan la analítica de datos y la inteligencia artificial (IA) para medir el desempeño en industrias manufactureras. Esto se hace con el propósito de apoyar la gestión de calidad, enfocándose en la mejora continua y la optimización de procesos, además de explorar la interacción con la *soft* metrología y los desafíos, dificultades y oportunidades que surgen con estas nuevas tecnologías. Se sigue un enfoque cualitativo de investigación mediante la revisión de literatura en bases de datos como ScienceDirect, IEEExplore y Google Scholar, para seleccionar y examinar documentos científicos que aborden estos temas según el marco de las preguntas de investigación. Se identifican tanto debilidades como fortalezas,

¹ Artículo de revisión.

² Estudiante de Tecnología en Control de la Calidad, integrante del semillero Metrología Científica, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, 050034, Medellín Colombia. Correo electrónico: isabeluribe288901@correo.itm.edu.co ORCID <https://orcid.org/0009-0004-1674-7624>

³ Profesor titular, Laboratorio AMYSOD, Grupo de Investigación en Calidad Metrología y Producción, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, 050034, Medellín Colombia. Correo electrónico: edilsondelgado@itm.edu.co ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4840-478X>

así como las restricciones en el contexto de la aplicación en la industria manufacturera. Se destaca la importancia de modelos de medición basados en datos proyectados en espacios de representación, donde la analítica de datos y la IA facilitan la creación de fronteras de decisión y superficies de regresión. Esto permite diseñar procesos de mejora y comprender los niveles dimensionales del desempeño, además de identificar tendencias y cambios en los indicadores. No obstante, se señalan dificultades en la traducción de los resultados obtenidos mediante herramientas computacionales en acciones concretas.

Palabras clave: gestión de producción; construcción y estimación de modelo; evaluación, validación y selección de modelo; métodos de pronóstico y predicción; calidad de la información y producto.

Abstract

The goal of this research consists of presenting a state of the art on strategies that combine data analytics and artificial intelligence for measuring the employees' performance in the manufacturing industry, as a support for quality management regarding continual improvement and processes optimization, the articulation with *soft metrology* and challenges, difficulties and opportunities that appear with the new technologies. An approach of qualitative research is used under a method of literature review on databases, such as, *ScienceDirect*, *IEEEExplore*, and *Google Scholar*, for selecting and examining scientific documents in order of analyze and discuss advances according to the framework of research questions. Likewise, weaknesses, strengths and constrains are also identified in the application context in manufacturing industry. The importance of measurement models based on data projected in representation spaces is observed, where data analytics and artificial intelligence perform decision boundaries and regression surfaces oriented towards process improvement and understanding of performance dimensional levels, as well as identifying trends and changes in indicators. However, the computing tools demonstrates a significant challenge when translating the results into concrete actions.

Keywords: production management, model construction and estimation, model evaluation, validation and selection, forecasting and prediction methods, information and product quality.

Resumo

O objetivo desta investigação é efetuar uma revisão exaustiva do estado da arte das estratégias que combinam a análise de dados e a inteligência artificial (IA) para medir o desempenho nas indústrias transformadoras. Isto é feito com o objetivo de apoiar a gestão da qualidade, centrando-se na melhoria contínua e na otimização dos processos, bem como de explorar a interação com a metrologia *suave* e os desafios, dificuldades e oportunidades que surgem com estas novas tecnologias. É seguida uma abordagem de investigação qualitativa através da revisão da literatura em bases de dados como a *ScienceDirect*, *IEEEExplore* e *Google Scholar* para selecionar e examinar artigos científicos que abordem estes tópicos de acordo com o quadro das questões de investigação. São identificados os pontos fracos e fortes, bem como as limitações no contexto da aplicação na indústria transformadora. Destaca a importância dos modelos de medição baseados em dados projectados em espaços de representação, onde a análise de dados e a IA facilitam a criação de fronteiras de decisão e superfícies de regressão. Isto permite conceber processos de melhoria e compreender os níveis dimensionais de desempenho, bem como identificar tendências e mudanças nos indicadores. No entanto, são relatadas dificuldades na tradução dos resultados obtidos através de ferramentas computacionais em acções concretas.

Palavras-chave: gestão da produção, construção e estimação de modelos, avaliação, validação e seleção de modelos, métodos de previsão e predição, informação e qualidade do produto.

Introducción

En la industria manufacturera, mejorar la satisfacción del cliente implica implementar métodos de análisis de sistemas de gestión de calidad utilizando Indicadores Clave de Desempeño (KPIs) (Manzano-Ibarra et ál., 2019). La literatura subraya que la medición del desempeño no debe ser un fin en sí misma, sino una parte esencial de la gestión, dado que la falta de una medición adecuada puede obstaculizar el cambio y la mejora (Kamble et ál., 2020). Por otro lado, la *soft* metrología se define como "el conjunto de modelos y técnicas que permiten la cuantificación computacional de magnitudes subjetivas, difíciles o costosas de medir, como la percepción humana o la dinámica de procesos complejos" (Vallejo et ál., 2019). Esta disciplina asegura la fiabilidad de las mediciones cuando se emplean técnicas computacionales, facilitando la gestión y la toma de decisiones basadas en los KPIs alineados con los objetivos estratégicos de la organización.

Es evidente la necesidad de técnicas cuantitativas, objetivas y consistentes para evaluar los indicadores asociados con la mejora en sistemas de gestión (Heikkilä, 2023). Los enfoques cualitativos, basados en encuestas con cuestionarios, son sensibles a las condiciones del estado de ánimo y al entendimiento preciso de las preguntas durante la recolección de datos (Sánchez-Marquez et ál., 2020). En contraste, la Inteligencia Artificial (IA) facilita la creación de espacios de representación donde el aprendizaje automático y la analítica de datos, a través de métodos estadísticos multivariados, pueden mejorar la comprensión de cómo interactúan los KPIs y cómo influyen en la satisfacción del cliente y la gestión de calidad en los procesos de manufactura. A pesar de que predominan en la literatura los enfoques cualitativos, se observa la necesidad de proponer nuevos enfoques cuantitativos mediante estrategias innovadoras basadas en IA (Goto, 2023). En este contexto, explorar nuevas estrategias de medición del desempeño como parte del análisis de sistemas de gestión de calidad, donde la analítica de datos y la IA se integren como herramientas de *soft* metrología para garantizar mediciones precisas (Vallejo et ál., 2023), es un tema relevante que merece atención en la literatura.

Este artículo tiene como objetivo presentar una revisión del estado del arte sobre estrategias que combinan la analítica de datos y la IA para medir el desempeño en los procesos de la industria manufacturera. Estas estrategias apoyan la gestión de calidad mediante la mejora continua y la optimización de procesos, integrando la *soft* metrología. Además, se exploran los desafíos, retos y oportunidades que surgen con estas nuevas tecnologías, promoviendo nuevas investigaciones para respaldar la toma de decisiones basada en mediciones confiables para la gestión de calidad.

El documento está estructurado en las siguientes partes: introducción, preliminares teóricos, metodología, resultados y discusión, y conclusiones. Los resultados abarcan la mejora continua y

la optimización de procesos mediante la analítica de datos e inteligencia artificial. Luego, se discute la integración de la *soft* metrología con la gestión de calidad y la medición de los indicadores clave de desempeño. Finalmente, se identifican los desafíos, dificultades y oportunidades en la combinación de análisis de datos e IA con la gestión de calidad, enfocándose en garantizar márgenes aceptables de precisión y robustez en la toma de decisiones en la industria manufacturera.

La industria manufacturera ha evolucionado hacia ecosistemas diversos que demandan nuevos enfoques para la toma de decisiones. Estos cambios subrayan la importancia de la medición orientada hacia la valoración, comprensión y toma de decisiones, incluyendo la evaluación del desempeño de los trabajadores (Kamble et ál., 2020).

La *soft* metrología se integra en los ecosistemas que incluyen las nuevas tecnologías de la información y el procesamiento computacional para caracterizar la dinámica manufacturera en espacios multivariados donde las decisiones requieren mediciones tanto objetivas como subjetivas (Vallejo et ál., 2019). En la industria manufacturera, la *soft* metrología se aplica mediante herramientas como la analítica de datos y la IA para asegurar la precisión de las mediciones, facilitando una toma de decisiones más confiable y desempeñando un papel crucial en la gestión de calidad. Estas herramientas permiten identificar patrones, tendencias y relaciones en grandes volúmenes de datos, facilitando decisiones informadas, la identificación de áreas de mejora y la predicción de resultados.

La integración de enfoques cuantitativos y cualitativos es fundamental para obtener una comprensión completa del desempeño del personal en la industria manufacturera. Los enfoques cuantitativos ofrecen mediciones objetivas y cuantificables, mientras que los enfoques cualitativos capturan aspectos subjetivos y contextuales que influyen en el rendimiento laboral. La inteligencia artificial potencia esta integración al analizar sistemáticamente datos complejos y heterogéneos (Carvalho y Lima, 2022).

Metodología

Este estudio adopta un enfoque de investigación cualitativa mediante un método de revisión de la literatura que incluye una búsqueda sistemática en bases de datos especializadas como Google Scholar, IEEEExplore y ScienceDirect. El objetivo es explorar las aplicaciones de la analítica de datos e inteligencia artificial en sistemas de gestión de calidad. Se seleccionaron y examinaron documentos científicos relevantes, seguidos de un análisis y discusión en el marco de preguntas de investigación predefinidas. La búsqueda en las bases de datos utilizó filtros específicos para seleccionar artículos pertinentes (ver tabla 1). La selección de información se basó en las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cómo pueden la analítica de datos y la inteligencia artificial contribuir a la mejora continua y la optimización de procesos?

- ¿Cómo se puede integrar la *soft* metrología con la gestión de la calidad en la industria manufacturera para mejorar la medición de los indicadores clave de desempeño y la toma de decisiones?
- ¿Cuáles son los desafíos, dificultades y oportunidades en la integración de estrategias basadas en la analítica de datos e inteligencia artificial con la gestión de la calidad?

Estas preguntas orientaron la búsqueda y selección de 50 documentos científicos relevantes, como se muestra en la Figura 1, para explorar tendencias y enfoques en la aplicación de la *soft* metrología en la gestión de la calidad.

Tabla 1. Resultados de la búsqueda bibliográfica en las principales bases de datos

Base de datos				
Términos	Google Scholar	IEEEExplore	ScienceDirect	Fecha de revisión
<i>soft metrology and key performance indicator</i>	22.100	0	482	24/08/2023
key performance indicators and “machine learning”	748.000	157	45.136	24/08/2023
“data analytics” and “quality management”	22.700	184	1.118	24/08/2023
“artificial intelligence” and key performance indicator	686.000	340	28.188	24/08/2023
metrology and “artificial intelligence”	66.000	97	1.218	24/08/2023
“performance measurement” and “machine learning”	4.890.000	2.619	3.619	24/08/2023
“performance measurement” and “artificial intelligence”	3.930.000	5.833	2.775	24/08/2023
“quality management” and “artificial intelligence”	4.330.000	1.922	3.027	24/08/2023

Fuente: elaboración propia.

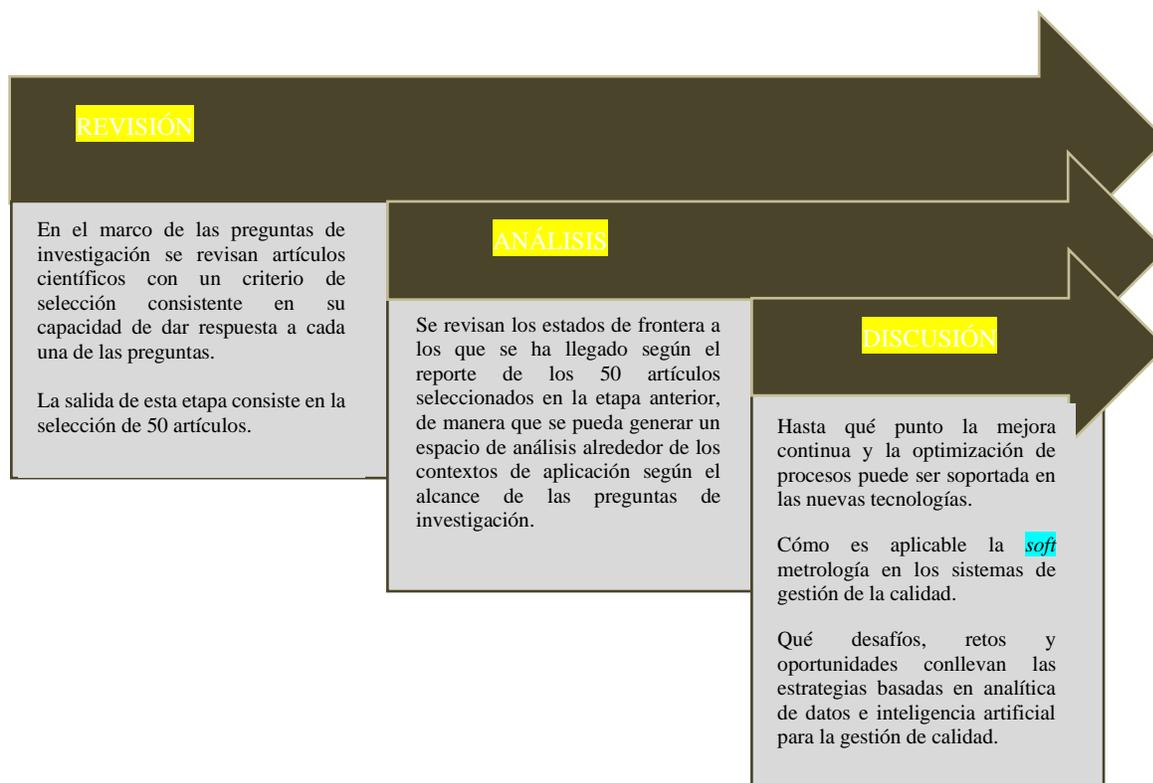


Figura 1. Etapas de la revisión de la literatura

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

A continuación se presentará la revisión del estado del arte y cada pregunta de investigación será discutida en apartados diferentes.

Mejora continua y optimización de procesos mediante analítica de datos e inteligencia artificial

La evolución tecnológica en las organizaciones plantea un desafío constante: cómo mantener la competitividad y eficiencia en un entorno de cambio continuo (Díaz-Ortega, 2019). En este contexto, la combinación de la analítica de datos e inteligencia artificial (IA) está transformando radicalmente la gestión operativa y la toma de decisiones estratégicas en las empresas (Adams, 1986; Papulova y Gazova, 2016). Estas tecnologías no solo aseguran la continuidad de las operaciones, sino que también impulsan el éxito y el crecimiento global de las organizaciones. La búsqueda constante de efectividad a través de la mejora continua y la optimización de procesos es crucial para mantener la relevancia y competitividad empresarial (Díaz-Muñoz y Salazar-Duque, 2021). La analítica de datos y la IA proporcionan herramientas de última tecnología que

revolucionan la forma en que las organizaciones abordan estos procesos (Sánchez-Marquez et ál., 2018).

Las nuevas tecnologías computacionales están redefiniendo el marco estratégico de las empresas, enfocadas en la búsqueda de eficiencia y excelencia operativa mediante el uso creciente de la analítica de datos e inteligencia artificial (IA) (Moubayed et ál., 2018). Estas herramientas permiten identificar oportunidades de mejora, tomar decisiones basadas en datos y automatizar tareas que antes requerían supervisión humana intensiva y subjetividad. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías conlleva desafíos técnicos significativos, como la incertidumbre, la dependencia de algoritmos convergentes, la capacidad de memoria y el procesamiento de grandes volúmenes de datos (Bottani y Vignali, 2019).

Empresas diversas están integrando la IA con la analítica de datos para mejorar servicios y procesos, desarrollando enfoques para coordinar el progreso y aprovechar la velocidad y consistencia de los algoritmos en entornos complejos (Diestra-Quinto et ál., 2021). Este avance computacional ha sido fundamental en los procesos de mejora continua y optimización de operaciones (Saltos-Zambrano y García-Loor, 2023). Además, el incremento de tecnologías como la automatización y el intercambio de datos ha remodelado los modelos de producción y operación, generando la necesidad de métricas y sistemas de evaluación del desempeño específicos para cada subsistema (Coito et ál., 2019).

La mejora continua de los procesos manufactureros mediante técnicas computacionales ha transformado el procesamiento y análisis de datos en tiempo real, mejorando la eficiencia y aumentando la confianza en la toma de decisiones, así como optimizando los procedimientos organizativos. Estas herramientas son cruciales para diferenciar entre competitividad y éxito sostenible (Kamble et ál., 2020). Algunos procesos requieren una redefinición drástica para asegurar la transparencia en las transacciones y buscar mejoras continuas en los nodos procesales específicos (Sosa-Sierra, 2007).

La tecnología *blockchain*, por su parte, introduce nuevos estándares de seguridad y confiabilidad en la auditoría de procesos para la gestión de calidad, mientras que la inteligencia artificial (IA) se posiciona como una aliada poderosa en la mejora continua, potenciando la eficiencia y la toma de decisiones basadas en históricos (Pacheco-Guzmán et ál., 2022). Esto implica la recopilación, análisis e interpretación de información estructurada para identificar áreas de mejora y optimización en los ciclos de proceso (León-Duarte et ál., 2020). De esta manera, las plataformas de cómputo se convierten en herramientas fundamentales para mejorar procesos, decisiones y eficiencia, especialmente en contextos contables y de auditoría, donde la validación de datos en tiempo real y la colaboración entre múltiples partes interesadas son esenciales para alcanzar los objetivos organizacionales (Han et ál., 2023, p. 5).

Desde la automatización de tareas hasta la toma de decisiones, surgen desafíos que deben abordarse cuidadosamente, como la identificación de parámetros intrínsecos de las dinámicas de estudio, las cuestiones éticas (privacidad, seguridad y equidad) y los requisitos clave que garantizan confiabilidad y optimización (Zhu et ál., 2022). En este contexto, se han establecido siete requisitos técnicos fundamentales para asegurar un proceso confiable y ético: legalidad, ética, supervisión humana, seguridad, privacidad de los datos, transparencia y responsabilidad en el desarrollo y uso de la inteligencia artificial (Han et ál., 2023).

Articulación de la *soft* metrología con la gestión de calidad y la medición de los indicadores clave de desempeño

El avance tecnológico en el entorno manufacturero plantea desafíos significativos en el manejo de los indicadores clave de desempeño (KPIs), que involucran el uso de datos y métricas relacionadas con la eficiencia y el rendimiento en múltiples áreas de impacto como el tiempo de respuesta, la satisfacción del cliente y la efectividad en la gestión de solicitudes (Plaza y Pawlik, 2021). El análisis continuo de los KPIs es crucial para mejorar la toma de decisiones basadas en datos, por lo tanto, es imperativo monitorear estos indicadores de forma constante a través de *dashboards* especializados (Wannes y Ghannouchi, 2019). Esto implica establecer conexiones entre métricas internas y externas al proceso, facilitando una transición fluida desde la evaluación del desempeño hacia una gestión más efectiva (Sánchez Márquez et ál., 2020). La implementación de sistemas de gestión de calidad basados en KPIs, impulsada por IA y analítica de datos, ofrece ventajas significativas al mejorar la competitividad organizacional, optimizar la producción y reducir la carga operativa (Kongar y Adebayo, 2021). Además, estas tecnologías tienen el potencial de proporcionar soluciones innovadoras y mejoras sustanciales en el ámbito de la calidad (Carvalho y Lima, 2022).

Gracias a la optimización de procesos y a la mejora continua en las organizaciones, ahora se incorporan técnicas modernas de procesamiento de datos cualitativos y subjetivos, aspectos que tradicionalmente no se consideraban en la medición del desempeño (Carvalho et ál., 2021). En este contexto, la *soft* metrología asegura la medición de fenómenos complejos y multivariados más allá de las evaluaciones cuantitativas convencionales, al enfocarse en la captura y evaluación de información perceptual, lo que es crucial para comprender las representaciones asociadas con la calidad (Vallejo et ál., 2023). Así, la analítica de datos y la IA mejoran los procesos de toma de decisiones en el sector manufacturero al capturar la interacción entre las habilidades humanas y las necesidades del proceso, enfrentando los desafíos específicos de la organización (Plaza y Pawlik, 2021).

Además, la literatura reconoce la medición de constructos intangibles relacionados con percepciones del comportamiento humano, tales como la satisfacción del cliente, la percepción de la marca y la calidad de los procesos internos, los cuales se gestionan en un espacio de representación multivariada dentro del contexto de la gestión de calidad. Estos constructos están

estratificados según estándares establecidos y requisitos predefinidos, lo que permite optimizar la eficiencia operativa (Zaid et ál., 2021). Los KPIs desempeñan un papel fundamental en esta representación, asociándose estrechamente con los constructos intangibles y contribuyendo significativamente a la gestión de calidad organizacional (Bottani y Vignali, 2019).

La articulación de la *soft* metrología con la gestión de la calidad implica la capacidad de medir y evaluar aspectos de percepción humana de manera confiable, asegurando la validez de los resultados mediante técnicas avanzadas de recolección, representación y análisis de datos para la toma de decisiones. Estos datos provienen de encuestas de satisfacción, análisis de percepción y evaluaciones de rendimiento y desempeño (Vallejo et ál., 2019). La proyección de los KPIs tradicionales a espacios de representación multivariada proporciona una visión más integrada del desempeño organizacional, donde la fiabilidad de la información es crucial para decisiones acertadas (Nuñez-Lira et ál., 2023). Así, el aumento del desempeño y la eficacia en la producción y gestión de procesos está directamente relacionado con la adopción de tecnologías avanzadas para dimensionar el rendimiento organizacional (Rodríguez-Castilla et ál., 2020), destacando la importancia de las mediciones de calidad en los procesos como garantía de mejora continua (Kamble et ál., 2020).

La gestión de calidad que incorpora el uso de tecnologías inteligentes de cómputo busca mitigar el error y la incertidumbre para asegurar resultados consistentes, con énfasis en los parámetros de calidad y gestión metrológica (Portuondo-Paisan y Portuondo-Moret, 2010). Se subraya la necesidad de que los sistemas de medición perceptual sean fiables y precisos al estimar índices e indicadores que describan la dinámica de los procesos de gestión de calidad (Robayo-Díaz, 2023). Además, se enfatiza la comprensión de los KPIs dentro del entorno industrial y la cuantificación de las interacciones entre ellos (Jooste y Botha, 2018). Los KPIs en el contexto industrial son datos que representan configuraciones y operaciones de los procesos organizacionales, proporcionando transparencia en la toma de decisiones y un respaldo sólido para la planificación y control (Manzano-Ibarra et ál., 2019). En (Badawy et ál., 2016), se destaca la capacidad de los KPIs para cuantificar la dinámica intrínseca de los procesos, ofreciendo un conocimiento más sólido y estructurado (Zhu et ál., 2022).

La *soft* metrología asegura la validez de la medición de los KPIs para evaluar y mejorar los procesos de calidad (Arbeláez-Botero et ál., 2008). Además, se integra en el contexto de la responsabilidad social empresarial, abarcando consideraciones no solo productivas, medioambientales y éticas, sino también la fidelización del cliente como recurso estratégico (Díaz-Rodríguez et ál., 2023).

En ámbitos como la contabilidad, auditoría o gestión de la calidad, la tecnología blockchain busca garantizar la precisión y el buen manejo de la información (Han et ál., 2023). La *soft* metrología, combinada con estas nuevas tecnologías de aseguramiento de la información en la medición de KPIs, destaca su importancia al facilitar la identificación de relaciones causales entre diferentes aspectos del proceso productivo, lo cual impacta positivamente en la satisfacción del cliente

(Todorovic et ál., 2013) y en la organización de estructuras de información en áreas intangibles o cualitativas (Sánchez-Marquez et ál., 2020). Así, se concentra el esfuerzo en la optimización y ajuste de los espacios de representación multivariada derivados de los KPIs, los cuales son puntos de monitoreo para evaluar la eficiencia de los procesos (Badawy et ál., 2016). En consecuencia, se resalta la importancia de utilizar datos y métricas para optimizar procesos, aumentar la producción y mejorar la satisfacción del cliente en un entorno productivo en constante evolución y transformación tecnológica (Plaza y Pawlik, 2021).

Desafíos, dificultades y oportunidades de la gestión de la calidad soportada por la analítica de datos y la inteligencia artificial

La integración de estrategias que combinan la analítica de datos y la IA con la gestión de calidad destaca por su capacidad para medir y evaluar la dinámica del comportamiento de los procesos productivos mediante tecnologías avanzadas de información, asegurando la calidad y eficiencia en las rutinas de evaluación (Pacheco-Guzmán et ál., 2022). Esto requiere una adaptación temprana a las nuevas tecnologías para optimizar el desempeño a través de la automatización, el procesamiento de datos, los sistemas ciber-físicos (CPS) y otros modos de soporte computacional que facilitan la implementación de la manufactura inteligente (Kamble et ál., 2020).

La cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0, está provocando transformaciones significativas en los procesos de producción (Schwab, 2020). Impulsada por tecnologías como el Internet de las cosas (IoT), la computación en la nube y el análisis de grandes volúmenes de datos (*big data*), esta revolución está facilitando la transformación desde la base operativa mediante la creación de sistemas de manufactura inteligente y la interconexión de las instalaciones de producción a través de los CPS (Yazici et ál., 2023). Esta integración con el sistema de gestión de calidad plantea desafíos económicos y competitivos al mejorar la representación de la dinámica productiva y la toma de decisiones, optimizando los procesos y maximizando la eficiencia (Sader et ál., 2019).

Las nuevas tecnologías de la información, como la inteligencia artificial (IA), la analítica de datos, el big data, los sistemas ciber-físicos (CPS) y el Internet de las Cosas (IoT), están generando oportunidades para desarrollar habilidades y competencias novedosas en el personal, especialmente en el ámbito de la gestión de calidad (Okrepilov et ál., 2022). Es crucial que los trabajadores adquieran competencias específicas para enfrentar los desafíos y adaptarse a los cambios provocados por esta revolución de la información (Montecinos, 2021). La capacidad de adaptación continua a las transformaciones tecnológicas y la comprensión profunda de cómo estas tecnologías impactan la gestión de calidad son fundamentales para promover un entorno empresarial dinámico (Santos et ál., 2021).

Esta transformación industrial se caracteriza por la automatización del análisis de datos en tiempo real, mejorando así la toma de decisiones y abordando aspectos como la eficiencia operativa, la

excelencia empresarial y la satisfacción del cliente (Ríos-Ramírez et ál., 2019; Sader et ál., 2019). El entorno digital en constante evolución presenta desafíos significativos en términos de modernización tecnológica y manejo de datos (Matas Ramió, 2018). La creciente importancia del internet en el ámbito empresarial está transformando notablemente la naturaleza de los empleos, requiriendo que los trabajadores sean cada vez más versátiles y adaptables a un entorno digital donde la información y la comunicación fluyen rápidamente (Robayo-Díaz, 2023; Corvalán, 2019).

Así, la IA y la analítica de datos están teniendo un impacto global en los procesos productivos, destacando la importancia de la eficiencia y efectividad en la creación y desarrollo de nuevos productos (Guaña-Moya y Chipuxi-Fajardo, 2023). Estas tecnologías están reconfigurando de manera significativa la dinámica operativa de las organizaciones (Flores-Vivar y García-Peñalvo, 2023).

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una revisión exhaustiva del estado del arte sobre las estrategias que integran la analítica de datos y la inteligencia artificial en la medición del desempeño en la industria manufacturera. Se discutió sobre la gestión de calidad enfocada en la mejora continua y la optimización de procesos, así como la articulación con la *soft* metrología y los desafíos, dificultades y oportunidades surgidos con las nuevas tecnologías. Se observó que esta integración está transformando significativamente la gestión de calidad y la optimización de procesos en las empresas, ofreciendo oportunidades para mejorar la eficiencia y la competitividad.

En un entorno manufacturero caracterizado por la rápida evolución tecnológica, la combinación de la analítica de datos y la inteligencia artificial está revolucionando la gestión empresarial (Estrada-Hernández y León-Robaina, 2013), garantizando no solo la continuidad operativa, sino también la eficiencia y la competitividad a escala global. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías plantea desafíos éticos y técnicos que deben abordarse con cuidado y responsabilidad. Es crucial que la optimización de procesos y la toma de decisiones estén alineadas con principios de éxito sostenible y responsable, adaptándose a las oportunidades y condiciones específicas de cada organización.

La incorporación de la *soft* metrología, la analítica de datos y la inteligencia artificial ha transformado radicalmente la mejora continua en las organizaciones al facilitar la recopilación de datos cualitativos y subjetivos, anteriormente no considerados, para una comprensión más completa de la calidad. La *soft* metrología asegura una medición confiable de fenómenos complejos, mientras que la analítica de datos y la inteligencia artificial mejoran significativamente la toma de decisiones. La proyección de los indicadores clave de desempeño (KPIs) en espacios de representación multivariada ofrece una visión integrada del desempeño organizacional, optimizando tanto la satisfacción del cliente como la eficiencia operativa.

La integración de la analítica de datos y la inteligencia artificial con la gestión de calidad introduce nuevas formas de optimizar procesos y asegurar la calidad y eficiencia en la producción. Sin embargo, la adaptación a estas tecnologías conlleva desafíos económicos y competitivos, así como la necesidad de personal capacitado con habilidades específicas. Estas nuevas tecnologías están reconfigurando de manera significativa la dinámica operativa de las organizaciones, impulsando la mejora en la creación de nuevos productos con un enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

Agradecimientos

Este trabajo se realiza en el marco del proyecto de investigación P20234, financiado por el Instituto Tecnológico Metropolitano ITM de Medellín y desarrollado en el Laboratorio AMYSOD de Parque i.

Conflicto de interés

Los autores manifiestan no tener algún tipo de conflicto de intereses con este trabajo y el manuscrito.

Referencias

- Adams, S. T. (1986). Artificial intelligence, culture, and individual responsibility. *Technology in Society*, 8(4), 251–257. [https://doi.org/10.1016/0160-791X\(86\)90014-X](https://doi.org/10.1016/0160-791X(86)90014-X)
- Arbeláez -Botero, M., Vargas- Mendoza, A. J. y Gutiérrez -Ospina, M. L. (2008). Importancia de la metrología al interior de las empresas para el aseguramiento de la calidad. *Scientia et Technica*, 38, 289–292.
- Badawy, M., El-Aziz, A. A. A., Idress, A. M., Hefny, H. y Hossam, S. (2016). A survey on exploring key performance indicators. *Future Computing and Informatics Journal*, 1(1), 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.fcij.2016.04.001>
- Bottani, E. y Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IIE Transactions*, 51(3), 284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- Carvalho, A. V., Enrique, D. V., Chouchene, A. y Charrua-Santos, F. (2021). Quality 4.0: An overview. *Procedia Computer Science*, 181, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.176>
- Carvalho, A. V. y Lima, T. M. (2022). Quality 4.0 and Cognitive Engineering Applied to Quality Management Systems: A Framework. *Applied System Innovation*, 5(115). <https://doi.org/10.3390/asi5060115>
- Coito, T., Viegas, J. L., Martins, M. S. E., Cunha, M. M., Figueiredo, J., Vieira, S. M. y Sousa, J. M. C. (2019). A novel framework for intelligent automation. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1825–1830. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.501>
- Corvalán, J. G. (2019). The current legal regime of the regional Administration in Spain: the provincial deputations after the local reform. *Revista de Direito Economico e Socioambiental*, 10(1), 30–66. <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v10i1.25870>
- Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Coeckelbergh, M., López de Prado, M., Herrera-Viedma, E. y Herrera, F. (2023). Connecting the dots in trustworthy Artificial Intelligence: From AI principles, ethics, and key requirements to responsible AI systems and regulation. *Information Fusion*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101896>

- Díaz-Muñoz, G. A. y Salazar -Duque, D. A. (2021). La calidad como herramienta estratégica para la gestión empresarial Quality as a strategic tool for business management. *PODIUM*, 39, 19–36. <https://doi.org/10.31095/podium.202>
- Díaz-Ortega, C. H. (2019). Gerencia estratégica como factor de competitividad en entornos cambiantes. *Dictamen Libre*, 13(25), 103–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.25.5762>
- Diestra -Quinto, N. M., Cordova-Villodas, A. J., Caruajulca - Montero, C. P., Esquivel - Cueva, D. L. y Nina-Vera, S. A. (2021). La inteligencia artificial y la toma de decisiones gerenciales. *Revista de Investigación Valor Agregado*, 8(1), 52–69. <https://doi.org/10.17162/riva.v8i1.1631>
- Estrada- Hernández, J. A. y León -Robaina, R. (2013). La integración de las tecnologías de información y comunicación en la gestión empresarial. *SANTIAGO*, 132, 634–646.
- Flores-Vivar, J. M. y García-Peñalvo, F. J. (2023). Reflections on the ethics, potential, and challenges of artificial intelligence in the framework of quality education (SDG4). *Comunicar*, 30(74), 35–44. <https://doi.org/10.3916/C74-2023-03>
- Goto, M. (2023). Anticipatory innovation of professional services: The case of auditing and artificial intelligence. *Research Policy*, 52(8). <https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104828>
- Guaña-Moya, J. y Chipuxi-Fajardo, L. (2023). Impacto de la inteligencia artificial en la ética y la privacidad de los datos. *RECIAMUC*, 7(1), 923–930. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.\(1\).enero.2023.923-930](https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(1).enero.2023.923-930)
- Han, H., Shiwakoti, R. K., Jarvis, R., Mordí, C. y Botchie, D. (2023). Accounting and auditing with blockchain technology and artificial Intelligence: A literature review. *International Journal of Accounting Information Systems*, 48. <https://doi.org/10.1016/j.accinf.2022.100598>
- Heikkilä, J. T. S. (2023). Key performance indicators for utility model systems. *World Patent Information*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2023.102222>
- Jooste, J. L., y Botha, L. J. (2018). Improvements towards the identification and quantification of relationships between key performance indicators. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29(2), 92–101. <https://doi.org/10.7166/29-2-1872>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Ghadge, A., y Raut, R. (2020). A performance measurement system for industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMES- A review and empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107853>
- Kongar, E., y Adebayo, O. (2021). Impact of Social Media Marketing on Business Performance: A Hybrid Performance Measurement Approach Using Data Analytics and Machine Learning. *IEEE Engineering Management Review*, 49(1), 133–147. <https://doi.org/10.1109/EMR.2021.3055036>
- León-Duarte, J. A., De La Re-Iñiguez, B. M. y Romero-Dessens, L. F. (2020). Ventajas del uso de sistemas de trazabilidad electrónica en procesos de manufactura. *Informacion Tecnológica*, 31(1), 237–244. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000100237>
- Manzano-Ibarra, M., Zamora-Sánchez, R. y Medina-Chicaiza, P. (2019). Propuesta metodológica para la generación de indicadores clave de desempeño apoyada en tecnología de información. *3C Tecnología_Glosas de Innovación Aplicadas a La Pyme*, 29(1), 10–29. <https://doi.org/10.17993/3ctecno/2019.v8n1e29/10-29>
- Matas Ramió, C. (2018). El impacto de la inteligencia artificial y de la robótica en el empleo público. *GIGAPP Estudios Working Papers*, 98, 401–421. <https://www.gigapp.org/ewp/index.php/GIGAPP-EWP/article/view/115>
- Montecinos, E. (2021). Cuarta revolución industrial y la administración pública en América Latina. *Revista Venezolana de Gerencia*, 26(93), 10–25. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>

- Moubayed, A., Injadat, M., Nassif, A. B., Lutfiyya, H., y Shami, A. (2018). E-Learning: Challenges and Research Opportunities Using Machine Learning Data Analytics. *IEEE Access*, 6, 39117–39138. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851790>
- Núñez-Lira, L. A., Alfaro Bernedo, J. O., Aguado Langan, A. M. y González Ponce de León, E. R. (2023). Toma de decisiones estratégicas en empresas: Innovación y competitividad. *Revista Venezolana de Gerencia*, 28(9), 628–641. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.e9.39>
- Okrepilov, V. V., Kovalenko, B. B., Getmanova, G. V. y Turovskaj, M. S. (2022). Modern Trends in Artificial Intelligence in the Transport System. *Transportation Research Procedia*, 61, 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.01.038>
- Pacheco -Guzmán, J. C. J., De la Cruz -Rodríguez, G. R., Quispe- Sánchez, E. S., Ríos -Reyes, J. A., Vásquez - Chiclayo, R. Y. y Vigo -Rodríguez, D. E. (2022). Artificial Intelligence for the Integration of Blockchain in the Supply Chain: A Systematic Review. *Gestión de Operaciones Industriales*, 1(1), 38–51. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2022.08>
- Papulova, Z. y Gazova, A. (2016). Role of Strategic Analysis in Strategic Decision-Making. *Procedia Economics and Finance*, 39, 571–579. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(16\)30301-x](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(16)30301-x)
- Plaza, M. y Pawlik, L. (2021). Influence of the Contact Center Systems Development on Key Performance Indicators. *IEEE Access*, 9, 44580–44591. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066801>
- Portuondo -Paisan, Y. y Portuondo -Moret, J. (2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición. *TECNOLOGÍA QUÍMICA*, XXX(2), 117–121.
- Ríos -Ramírez, L. C., Pérez- Domínguez, L. y Pérez -Olguin, I. J. C. (2019). Tendencias actuales de la industria 4.0. *Reflexiones Contables*, 2(2), 8–22. <https://doi.org/10.22463/26655543.2995>
- Robayo -Díaz, E. D. (2023). Impacto de la Inteligencia Artificial en la Seguridad de la Información. En *Especialización En Seguridad Informática* (Tesis especialización, Universidad Piloto de Colombia) (págs. 1–11). <https://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/13071?show=full>
- Rodríguez-Castilla, M. M., Quintero-Quintero, W. y Pacheco-Sánchez, C. A. (2020). Production costs: Innovations and strategic practices of manufacturing mipymes. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, 8(1), 131–139. <https://doi.org/10.15649/2346030X.720>
- Sader, S., Husti, I., y Daróczy, M. (2019). Industry 4.0 as a key enabler toward successful implementation of total quality management practices. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 27(2), 131–140. <https://doi.org/10.3311/PPso.12675>
- Saltos- Zambrano, J. E. y García- Loor, M. G. (2023). Instrumentos de Medición y su Influencia en la Calidad del Proceso de Enseñanza Aprendizaje de la Asignatura Metrología. *Instrumentos de Medición y Su Influencia En La Calidad Del Proceso de Enseñanza Aprendizaje de La Asignatura Metrología*, 9(3), 89–100. <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3.3433>
- Salvador, V. L., Mamaqi, X. y Bordes, J. V. (2020). Artificial intelligence: Theoretical, formative and communicative challenges of datification. *Icono14*, 18(1), 58–88. <https://doi.org/10.7195/RI14.V18I1.1434>
- Sánchez- Marquez, R., Albarracín -Guillem, J. M., Vicens -Salort, E. y Jabaloyes- Vivas, J. (2020). Diagnosis of quality management systems using data analytics – A case study in the manufacturing sector. *Computers in Industry*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103183>
- Sánchez-Marquez, R., Albarracín-Guillem, J. M., Vicens-Salort, E. y Jabaloyes -Vivas, J. (2018). A statistical system management method to tackle data uncertainty when using key performance indicators of the balanced scorecard. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.07.010>

- Santos, G., Sá, J. C., Félix, M. J., Barreto, L., Carvalho, F., Doiro, M., Zgodavová, K. y Stefanović, M. (2021). New needed quality management skills for quality managers 4.0. *Sustainability*, 13, 6149. <https://doi.org/10.3390/su13116149>
- Schwab, K. (2020). La cuarta revolución Industrial. *FUTURO HOY*, 1(1), 6–10. <https://doi.org/10.52749/fh.v1i1.1>
- Sosa- Sierra, M. D. C. (2007). Inteligencia artificial en la gestión financiera empresarial. *Pensamiento y Gestión*, 23, 153–186.
- Todorovic, M., Mitrovic, Z., y Bjelica, D. (2013). Measuring Project Success in Project-Oriented Organizations. *Management - Journal for Theory and Practice of Management*, 18(68), 41–48. <https://doi.org/10.7595/management.fon.2013.0019>
- Vallejo, M., Bahamón, N., Rossi, L., y Delgado-Trejos, E. (2023). Soft Metrology. En *Handbook of Metrology and Applications* (pp. 1–31). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1550-5_67-1
- Vallejo, M., De La Espriella, C., Gómez-Santamaría, J., Ramírez-Barrera, A. F. y Delgado-Trejos, E. (2019). Soft metrology based on machine learning: A review. En *Measurement Science and Technology* (vol. 31, issue 3). Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab4b39>
- Wannes, A. y Ghannouchi, S. A. (2019). KPI-Based Approach for Business Process Improvement. *Procedia Computer Science*, 164, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.182>
- Yazici, İ., Shayea, I. y Din, J. (2023). A survey of applications of artificial intelligence and machine learning in future mobile networks-enabled systems. In *Engineering Science and Technology, an International Journal* (Vol. 44). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101455>
- Zaid, S., Palilati, A., Madjid, R. y Abadi, S. Y. (2021). The effect of supply chain integration on customer loyalty: The mediating roles of operational performance and customer satisfaction. *Uncertain Supply Chain Management*, 9(4), 867–876. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2021.8.002>
- Zhu, T., Ye, D., Wang, W., Zhou, W. y Yu, P. S. (2022). More Than Privacy: Applying Differential Privacy in Key Areas of Artificial Intelligence. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 34(6), 2824–2843. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2020.3014246>