



MONITORAMENTO E INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DE JUNTAS APARAFUSADAS NA MANUFATURA 4.0

Felipe de Almeida Gomes

Universidade Federal Fluminense (fe_gomes@id.uff.br)

Maria Luísa Rodrigues da Silva

Universidade Federal Fluminense (ma_luisa@id.uff.br)

Maria Elisa Rodrigues da Silva

Universidade Federal Fluminense (ma_elisa@id.uff.br)

Cecilia Toledo Hernandez

Universidade Federal Fluminense (cetoledo@id.uff.br)

Resumo

O avanço da Indústria 4.0 tem promovido profundas transformações nos sistemas produtivos, integrando máquinas, pessoas e processos. Este estudo analisa a aplicação das tecnologias da Manufatura 4.0 no monitoramento e integração de sistemas de juntas aparafusadas em uma linha de produção automotiva. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem qualitativa, teve como objetivo propor melhorias no processo de aperto de torques críticos, visando aumentar a qualidade, rastreabilidade e sustentabilidade. Foram identificadas deficiências no método tradicional, como falta de precisão e ausência de controle digital. A proposta baseia-se no uso de tecnologias da Internet das Coisas (IoT) e integração de sistemas para coleta e análise de dados em tempo real. Os resultados demonstraram ganhos expressivos em produtividade, redução de custos e melhoria da segurança operacional. A digitalização do processo reduziu o uso de papel e aumentou o controle sobre parâmetros críticos de produção, contribuindo para uma manufatura mais sustentável e inteligente.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Palavras-chave: Indústria 4.0, Manufatura 4.0, IoT, Juntas aparafusadas, Sustentabilidade.

Abstract

The advancement of Industry 4.0 has driven significant transformations in production systems, integrating machines, people, and processes. This study analyzes the application of Manufacturing 4.0 technologies in monitoring and integrating bolted joint systems in an automotive production line. The applied qualitative research aimed to propose improvements in the tightening process of critical torques to enhance quality, traceability, and sustainability. Deficiencies in the traditional method, such as lack of precision and digital control, were identified. The proposal is based on the use of Internet of Things (IoT) technologies and system integration for real-time data collection and analysis. The results demonstrated expressive gains in productivity, cost reduction, and operational safety. Process digitalization reduced paper use and improved control of critical production parameters, contributing to a more sustainable and intelligent manufacturing environment.

Keywords: Industry 4.0, Manufacturing 4.0, IoT, Bolted joints, Sustainability.

Resumen

El avance de la Industria 4.0 ha impulsado profundas transformaciones en los sistemas productivos, integrando máquinas, personas y procesos. Este estudio analiza la aplicación de las tecnologías de Manufactura 4.0 en el monitoreo e integración de sistemas de uniones atornilladas en una línea de producción automotriz. La investigación, de naturaleza aplicada y enfoque cualitativo, tuvo como objetivo proponer mejoras en el proceso de apriete de torques críticos, buscando aumentar la calidad, la trazabilidad y la sostenibilidad. Se identificaron deficiencias en el método tradicional, como la falta de precisión y de control digital. La propuesta se basa en el uso de tecnologías del Internet



de las Cosas (IoT) y la integración de sistemas para la recolección y análisis de datos en tiempo real. Los resultados mostraron mejoras significativas en productividad, reducción de costos y seguridad operativa. La digitalización del proceso redujo el uso de papel y permitió un mayor control de los parámetros críticos de producción, contribuyendo a una manufactura más sostenible e inteligente.

Palabras clave: Industria 4.0, Manufactura 4.0, IoT, Uniones atornilladas, Sostenibilidad.

1. Introdução

A globalização da economia, intensificada por diversos agentes tem aumentado a conscientização relacionada a questões que envolvem sustentabilidade (Suriyankietkaew; Petison, 2020). Junto com a preocupação ambiental, tem-se o fato de que as inovações tecnológicas exigem que as empresas sejam capazes de oferecer produtos e serviços inovadores aos seus consumidores, isto leva as indústrias a abandonarem os métodos clássicos de produção e voltar-se para as novas exigências do mercado, como a utilização de tecnologias em todas as suas atividades (Hozdic, 2015).

Neste contexto surge um novo modelo de negócios comandado pela Quarta Revolução Industrial, também chamada Indústria 4.0 (I4.0) que engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem que estão mudando as formas de produção. Para Schwab (2016), a I4.0 redefine a forma de produzir, gerir e consumir, trazendo a manufatura inteligente como elemento central dessa transformação.

As aplicações de tecnologias da I4.0 vem ganhando espaço nos processos de manufatura, hoje é comum ouvir o termo “Manufatura 4.0” associado ao uso destas tecnologias. Santos, Manhães e Lima (2018) destacam que a Manufatura 4.0 é resultado direto da aplicação prática das tecnologias digitais da I4.0 no chão de fábrica, permitindo maior eficiência, flexibilidade e personalização da produção. Como principal vantagem, a



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Manufatura 4.0 possibilita a criação de sistemas produtivos interconectados e inteligentes, em que máquinas, produtos e pessoas comunicam-se em tempo real, viabilizando processos mais ágeis, eficientes e sustentáveis (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013; Hermann; Pentek; Otto, 2016)

Independente de todos os impactos positivos a I4.0 envolve fatores de grande complexidade como segurança da informação, retorno financeiro, indisponibilidade de serviço ou sistema, prazo de implantação, que devem ser considerados para identificar a melhor solução ou até a priorização de soluções conforme as necessidades da indústria em cada caso particular (Sotolani et al., 2024).

Na indústria automotiva que será objeto do estudo, o sistema de montagem atual das cabines do veículo usa ferramentas eletrônicas como o poka-yoke, na linha montagem visando evitar possíveis erros, mas a parte do processo de aperto para o controle dos torques críticos feito pela qualidade não é robusta, pois é utilizado uma apertadeira pneumática e torquímetros de relógio que apresenta riscos, perda de rastreabilidade, falhas operacionais e desgaste dos equipamentos.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar e propor uma melhoria baseada no uso de tecnologias da I4.0 nos processos de realização de torque na linha de produção automotiva. Este uso de novas tecnologias, permitirá a rastreabilidade do processo com a integração das (IoT- Internet das coisas), digitalização de processos e melhoria da qualidade e da segurança na produção de cabines automotivas.

A implementação dessas práticas de análise de dados pode resultar em uma produção mais eficiente, redução de custos e, maior satisfação dos clientes e por consequência automatizar o processo na linha de produção e resolver problemas, riscos e impactos do método atual.

O artigo é composto por seis seções, além desta introdução. Na segunda seção é apresentado o referencial teórico sobre a I4.0, conceitos, impactos, barreiras e críticas. Na terceira seção, é discutida a metodologia utilizada, assim como a descrição da empresa

estudada. Na seção 4, são apresentados os resultados, na seção 5 aparecem as discussões, seguidos das considerações finais apresentadas na seção 6.

2. Fundamentação teórica

2.1 Indústria 4.0

Oztemel e Fursev (2020) definem a I4.0 como uma filosofia de produção com sistemas automatizados e com certa autonomia, com a implementação de novas tecnologias, capaz de promover produção mais rápida e eficiente. As tecnologias da I4.0 podem ser físicas que estão relacionadas às tecnologias de fabricação e as digitais relacionadas às tecnologias de informação e comunicação, como IoT (Internet das Coisas), simulação, *Big Data*, robôs autônomos (Bai et al., 2020).

Algumas dessas tecnologias são descritas a seguir, destacando suas características e aplicações:

- *Big Data*: tecnologia com dados estruturados e não-estruturados oriundos de diferentes fontes de dados, com grande volume de informação. A capacidade de interpretar grande volume de dados permite compreender o perfil dos clientes, diminuir a necessidade de paradas não-programadas e definir fornecedores (Amaral, 2016; Chen; Mao; Liu, 2014; Wamba et al., 2015);
- Computação em nuvem: utilização de softwares baseados em nuvem para armazenamento e compartilhamento de dados, permitindo o processamento de grande quantidade de informações em tempo de resposta de milissegundo (Rüssman et al., 2015). Com a adesão desses recursos, torna-se mais barato e acessível guardar informações em servidores, onde é possível ter acesso e editá-las na hora e local que desejar com muito mais rapidez e menos custos (Bokhari et al., 2016);
- Internet das Coisas (IoT): rede global que permite a integração do mundo virtual com o mundo físico, por meio da utilização de sensores que promovem a coleta, processamento e análise dos dados (Albertin, 2017). Sendo a conexão avançada de dispositivos e de um

sistema que tem a capacidade de enviar e receber informações, usufruindo de uma rede de dados, que por meio da unicidade de cada dispositivo (Brandão; Neves, 2021);

- Realidade aumentada: tecnologias que promovem a representação do espaço físico em meio digital, por meio de dispositivos tecnológicos, como óculos de realidade aumentada. Dessa forma, facilita a visualização e orientação para trabalhos de manutenção, quando o operador não está presente no local (Rüssman et al., 2015). Uma técnica de computação gráfica que une elementos virtuais com o ambiente físico, para proporcionar uma experiência imersiva e interativa aos usuários, amplamente utilizada para melhorar a eficiência e a segurança dos processos produtivos (Rentzos, et al., 2013);

- Robótica autônoma: O uso de robôs autônomos também conhecidos como robôs inteligentes ou colaborativos (*Collaborative Robot – Cobots*), já se faz presente em muitas indústrias na realização de tarefas complexas, no caso da I4.0 possuem características diferenciadas como a independência para trabalhar sem supervisão ou intervenção humana, interagindo de forma inteligente com outras máquinas, apresentando maior flexibilidade e cooperação, por um custo menor e maior alcance de capacidades (Mariottoni et al, 2022);

- Simulação: utilização de dados que possibilita a avaliação dos possíveis cenários e permite a realização de testes em ambiente virtual antes da mudança no processo na situação real, com foco na melhoria da qualidade do processo e redução de custos e tempos do processo (Rüssman et al., 2015). A prática de simular traz toda a cadeia de produção de um produto ou serviço para o ambiente virtual, o que possibilita o aperfeiçoamento e a realização de testes e até mesmo a configuração de máquinas e equipamentos antes de qualquer mudança real (Couto, 2019);

- Tecnologia da informação e comunicação (TICs): sistemas utilizados para a comunicação em tempo real com as máquinas do processo produtivo, com o objetivo de monitorar e controlar a produção. Vários autores enfatizam como as TICs, aliadas à automação e à manufatura inteligente, possibilitam a rastreabilidade, otimização analítica e a auto-organização em redes de comunicação industriais (Sacomano; Satyro, 2018; Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013, 2013);

- **Manufatura Aditiva:** também conhecida como impressão 3D, tem o intuito de criar objetos tridimensionais possibilitando a prototipagem rápida, reduzindo o tempo de entrega, reduzindo desperdícios e otimizando os processos manufatureiros (Schwab, 2016);

Segurança Cibernética: Sistema de proteção aos dispositivos conectados garantindo a proteção de dados, evitando assim o roubo de informações sigilosas e garantindo a confiabilidade do processo de manufatura (Lezzi, Lazoi, Corallo, 2018);

Integração de Sistemas: É compreendido como a conexão entre sistemas, visando operar de modo sistematizado, permitindo assim a tomada de decisão em tempo real, otimizando a cadeia de distribuição desde o fornecedor de matéria prima até o recebimento do produto (Tropia, 2017).

Na atualidade já existem estudos relevantes de aplicação das diferentes tecnologias da I4.0 no contexto empresarial e industrial. Gonçalves (2024) explora como a I4.0 no Brasil integra tecnologias modernas de informação e comunicação, formando uma nova fase de criação de valor por meio da conectividade e integração de dados. Bettiol, Almeida e Rodrigues (2022) investigam a relação entre grupos de TICs e tecnologias da Indústria 4.0, analisando seus impactos na transformação digital e na competitividade das empresas. Maia (2023) apresenta um estudo de caso sobre o uso de TICs no setor de saneamento básico, destacando como a comunicação em tempo real e a integração de sistemas melhoram a eficiência operacional.

2.2. Impacto do uso das tecnologias da Indústria 4.0

Dalenogare et al. (2018), apresenta uma análise baseada em uma pesquisa com mais de 2000 indústrias brasileiras cujo objetivo foi avaliar as expectativas das empresas em relação aos benefícios da adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Como contribuições do estudo se destacam: a percepção das tecnologias da I4.0 como promissoras para melhorar o desempenho industrial, especialmente nas áreas de produto e operações; foram identificadas algumas tecnologias emergentes da I4.0 que não foram percebidas como promissoras para a realidade brasileira o que poderia exigir uma implementação parcial destes conceitos adaptando-os às realidades locais.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

De maneira geral muitos autores identificam impactos positivos ao se adotar princípios e tecnologias da I4.0. Estes impactos que podem ser analisados desde a ótica da sustentabilidade em cada uma das dimensões: econômica, social e ambiental.

Na dimensão econômica as tecnologias da I4.0 impactam no aumento da eficiência, melhoria da qualidade, agilidade nas respostas às mudanças no mercado e organização dos seus processos internos (Blichfeldt; Faullant, 2021; Margherita; Baccini, 2020). O aumento da eficiência está relacionado ao aumento da produtividade e disponibilidade de equipamentos.

A utilização de sistemas de Tecnologia da Informação (TI) fornece suporte às operações e facilita a integração entre profissionais, processos e dados. Tecnologias como IoT permitem o processamento de dados oriundos dos processos de forma direta, permitindo a padronização e automatização dos processos e diminuindo os riscos causados por erro humano (Sebastian et al., 2017). A aplicação de mineração de dados (*data mining*) e inteligência artificial auxiliam no planejamento e permite antecipar problemas na indústria, como o diagnóstico de equipamentos em tempo real, indicando período de manutenção e identificação de gargalos na linha de produção (Brochado; Rocha; Almeida, 2022; Coelho et al., 2022).

Tecnologias como RFID são utilizadas para rastrear o material que flui ao longo do processo produtivo, permitindo controle mais eficiente do estoque e eliminação de desperdícios de espera (Cui et al., 2017). Robôs autônomos podem ser utilizados no transporte de matérias-primas e produtos acabados entre armazéns e nas etapas do processo (Rüssman et al., 2015).

Ainda dentro da dimensão econômica, a agilidade considera a capacidade de responder rapidamente às mudanças no mercado e customizar produtos conforme demanda do consumidor. Ferramentas de simulação podem ser utilizadas para testar cenários e antecipar o modo que os clientes, operadores e tomadores de decisão vão interagir com os equipamentos e produtos (Blichfeldt; Faullant, 2021). A impressão 3D permite a redução dos lotes de produção e desenvolvimento de produtos mais customizáveis, além de

permitir desenvolvimento de novos produtos, focados na redução do peso e dos custos de matéria-prima (Rüssman et al., 2015).

Na dimensão social, os impactos gerados pela I4.0 estão relacionadas ao mercado de trabalho e às condições de trabalho. A adoção de tecnologias da I4.0 permite a adaptação dos processos em um cenário com cargas de trabalho menos pesadas, eliminação dos riscos ergonômicos. (Rüssman et al., 2015). A automatização dos processos reduz a probabilidade de acidentes, visto a diminuição de risco de acidente causado por erro humano. Tecnologias como gêmeos digitais e inteligência artificial permite a substituição do ser humano em ambientes e situações perigosas, com risco de explosão, variações de temperaturas e exposição a elementos químicos e radioativos (Blichfeldt; Faullant, 2021). A dimensão da sustentabilidade ambiental também é impactada com a adoção de tecnologias da I4.0. Estes impactos estão relacionados a redução de emissão de gases poluentes, a redução de consumo de recursos naturais e a implementação de práticas de indústria circular. Para Berg et al. (2021) muitas das tecnologias utilizadas permitem o reaproveitamento dos materiais ao longo do processo produtivo, já que facilitam a identificação da localização em tempo real e diminui o desperdício de materiais.

2.3 Barreiras e críticas da Indústria 4.0

Embora a I4.0 seja reconhecida como uma revolução tecnológica capaz de transformar processos produtivos, ela enfrenta diversas barreiras e críticas que limitam sua adoção, especialmente em países emergentes.

Entre as barreiras se destacam:

- Altos custos de investimento para algumas das tecnologias o que dificulta a adesão de pequenas e médias empresas (Dalenogare et al., 2018);
- Falta de qualificação profissional dada a necessidade de mão de obra altamente qualificada para lidar com sistemas digitais e analíticos ainda é um desafio (Ozemel; Gursev, 2020). A automação dos processos e falta de qualificação em novas tecnologias podem gerar receio nos profissionais em relação ao impacto sobre o emprego, resultante de eliminações ou substituições de postos de trabalho. Essas questões devem ser

consideradas pelos gestores durante às etapas de planejamento e implementação das iniciativas (Birkel et al., 2019);

- Integração tecnológica devido à heterogeneidade dos sistemas nas indústrias dificulta a interoperabilidade entre máquinas e softwares (Hermann; Pentek; Otto, 2016);
- Resistência cultural porque mudanças organizacionais profundas encontram resistência por parte de gestores e trabalhadores (Santos; Manhães; Lima, 2018);
- Infraestrutura tecnológica insuficiente dada a ausência de redes de alta velocidade e infraestrutura digital limita a implementação em muitos países (Bai; Sarkis; Dou, 2020).

Como críticas da I4.0 se destacam:

- Visão excessivamente tecnológica por enfatizar mais a inovação tecnológica do que os impactos sociais e humanos do processo produtivo (Frank; Dalenogare; Ayala, 2019);
- Desigualdade social porque a automação pode ampliar a exclusão de trabalhadores menos qualificados, gerando desemprego e desigualdades (Schwab, 2016);
- Enfoque limitado em sustentabilidade porque apesar de prometer eficiência as tecnologias da I4.0 nem sempre garantem redução de impactos ambientais, sendo necessário maior alinhamento com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) (Dalenogare et al., 2018; Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

Dada as críticas fundamentais da I4.0, surge um novo conceito que está em evolução, o de Indústria 5.0 (I5.0) propondo uma abordagem mais centrada no ser humano, na sustentabilidade e na resiliência dos sistemas produtivos (European Commission, 2021). Diferente da I4.0, que prioriza a tecnologia, a I5.0 enfatiza a colaboração entre humanos e máquinas inteligentes, bem como a integração com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A mudança de foco na I5.0, ao estar centrado na humanização, sustentabilidade e resiliência muda o papel do trabalhador, do uso das tecnologias chaves, assim como a perspectiva social e de sustentabilidade esta última alinhada à economia verde e circular (Nakamura et al., 2022; Adel, 2022)

3. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada quanto à natureza da pesquisa, visto que o objetivo é gerar conhecimento para aplicação prática de um problema específico (Gil, 2025). Em relação a abordagem da pesquisa, a pesquisa é qualitativa, pois considera que existe uma relação entre o sujeito e o contexto analisado que não pode ser traduzido descrito de forma numérica (Collins; Hussey, 2005). No ponto de vista dos objetivos, a pesquisa é definida como exploratória, pois tem como objetivo tornar o problema explícito e formular hipóteses (Gil, 2025).

A presente pesquisa busca avaliar a implementação de tecnologias da indústria 4.0 no processo produtivo de juntas aparafusadas e análise de torques críticos, de modo a fornecer reflexões importantes para melhoria do processo de produção, com foco na garantia da qualidade e da segurança do processo, a partir da análise das três dimensões: econômica, ambiental e social.

3.1 Procedimento Metodológico

Para melhor descrever o procedimento utilizado, foi desenvolvido o fluxograma conforme Figura 1.

Figura 1 - Procedimento metodológico utilizado

Pesquisa Bibliográfica

Levantamento de estudos baseados na I4.0 na Base Scopus e Web of Science

Levantamento das principais tecnologias de manufatura 4.0

Comparação entre os processos

Feito um levantamento do atual processo de juntas aparafusadas e comparando com o modelo proposto.

Levantando as Melhorias baseadas na IOT e Integração entre os sistemas.

Aplicação das Tecnologias da Manufatura 4.0

Desenvolvimento do novo processo de aperto baseado nas tecnologias da I4.0

Focado na Rastreabilidade do processo e na qualidade do aperto

Input de informação baseado na estação virtual e Poka-Yoke

Resultados e discussão

Análise dos resultados propostos

E levantamento dos pontos de melhora no processo de aperto

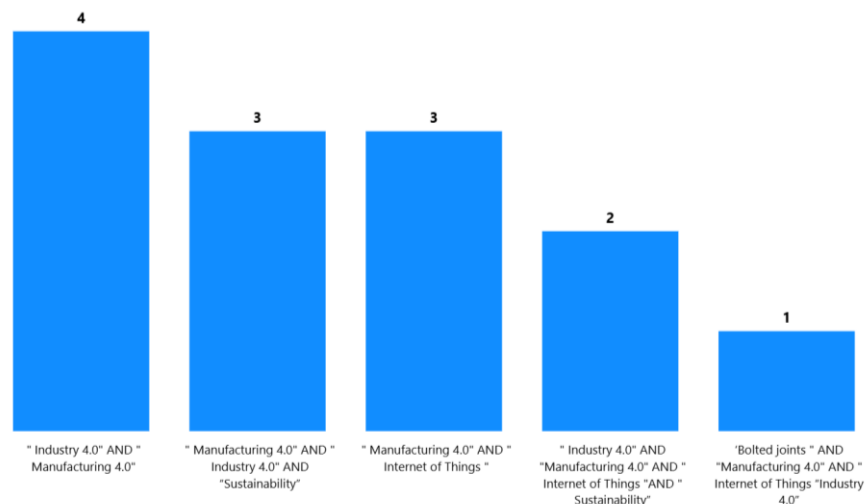
Fonte: Autores (2025)

Cada uma das etapas do procedimento mostrado na Figura 1 pode ser vista a seguir:

Pesquisa Bibliográfica: baseado nas pesquisas referentes aos anos de 2020 à 2025, foi realizado um apanhado dos artigos mais relevantes do tema de manufatura 4.0 ligados a IoT sendo escolhida as bases Web of Science e Scopus para essa análise. De todos os artigos selecionados foram filtrados e escolhidos 13 artigos da base Scopus para o desenvolvimento baseados na Indústria 4.0 como um todo e focando na conectividade das juntas aparafusadas e na sustentabilidade.

Conforme figura 2, foi desenvolvido um gráfico mostrando a quantidade de artigos que se enquadraram nas pesquisas das palavras chaves.

Figura 2: Quantidade de artigos analisados por palavras chaves



Fonte: Autores (2025)

Foram escolhidos como base de pesquisa quatro artigos com as palavras chaves "*Industry 4.0*" AND "*Manufacturing 4.0*", três com "*Manufacturing 4.0*" AND "*Industry 4.0*" AND "*Sustainability*" três com "*Manufacturing 4.0*" AND "*Internet of Things*" dois com "*Industry 4.0*" AND "*Manufacturing 4.0*" AND "*Internet of Things*" AND "*Sustainability*" e um com "*Bolted joints*" AND "*Manufacturing 4.0*" AND "*Internet of Things*" "*Industry 4.0*". Sendo essa a base teórica para o desenvolvimento do artigo.

Comparação entre os processos: Foi feito um levantamento mediante a observações do processo completo e detalhado existente de juntas aparafusadas em uma indústria automobilística que produz caminhões na área de armação de cabines, onde foi comparado os processos existentes e o novo. Baseando sempre nos métodos técnicos da I4.0 enfatizando a IoT e a conectividade entre os sistemas.

Aplicação das Tecnologias da Manufatura 4.0: Foi feito um levantamento mediante a observações das aplicações de torque na armação de cabines e escolhido uma célula de maneira aleatória para o início das modificações, nessa célula foi implantada a estação virtual onde foi conectada a apertadeira eletrônica e desenvolvido os treinamentos baseados no novo equipamento. Onde os operadores foram instruídos nas melhores técnicas de aperto e iniciaram o entendimento da metodologia nova.

Resultados e discussão: Após a implantação na célula de aplicação de torque foram levantados os resultados e levados ao gerente da área, para a aprovação ou reprovação, da implementação das tecnologias e dos métodos nas outras células. Como houve um ganho expressivo, a implantação das novas tecnologias de aperto e conectividades foram desenvolvidas para todas as células onde havia aplicação de torque.

4. Resultados e discussão

4.1 Caracterização do processo atual

A caracterização do processo é evidenciada pelos seguintes aspectos: Torque "NOT OK" podendo resultar em cabines com problemas de torque Alto e Torques Baixo, resultando no comprometimento da qualidade e confiabilidade do produto e problemas de segurança. Isso pode levar a recalls e danos à reputação da marca além de aumento dos custos operacionais: A correção de problemas relacionados ao torque "NOT OK" exige alocação adicional de recursos, incluindo materiais, mão de obra para o retrabalho e tempo de tempo ciclo, resultando em custos operacionais não previstos e redução da rentabilidade além da Perda de Produtividade, Atrasos na Entrega do produto para os clientes, Riscos de Segurança resultando em risco para a vida do motoristas, passageiros e outros usuários da estrada, aumentando o potencial de acidentes e exposição a responsabilidades legais.

Processo de aparafusamento das juntas.

O processo de aparafusamento é realizado por uma Apertadeira Pneumática, como mostrado na Figura 3, sendo um equipamento defasado e sem nenhuma rastreabilidade sistêmica, podendo assim gerar falhas no aperto e não garantia do correto processo de torques críticos.

Figura 3 – Apertadeira Pneumática



Fonte: Google, 2025

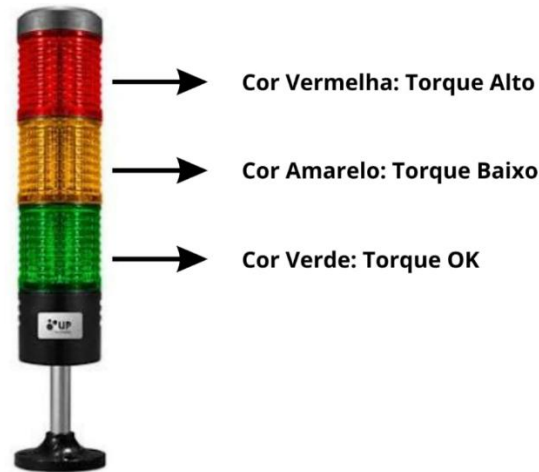
Analizando o processo de montagem levando em conta a qualidade dos apertos, o processo possui uma baixa precisão dos valores coletados, com a possibilidade de erros operacional e fixações não torquedadas, pois não existe o controle de qual fixação foi apertada ou não. Sendo assim, não existe integração entre os dados coletados pela produção e pela qualidade e impossibilitando a emissão de alertas em caso de não conformidades no processo.

Além das questões de processos em destaque, para fazer a coleta analógica são necessários um investimento alto de mão de obra, tempo ciclo e treinamento, além de 163 folhas utilizadas todos os dias, com a necessidade de armazenamento entre 5 a 15 anos.

4.2 Caracterização do processo proposto:

1. Servidor compartilhado: Utilização do servidor para a armazenagem dos apertos das fixações utilizando o método de IoT (*Internet of Things*) e a Integração entre os Sistemas.
2. Poka-yoke :Método de prevenção de falhas baseada na Manufatura 4.0.
Como mostrado na Figura 4

Figura 4 – Poka-Yoke



Fonte: Autores, 2025

Sendo que no atual processo não existe essa sistemática de Poka-Yoke , pois não há integração entre os sistemas de aperto.

3. Controlador da ferramenta (Estação virtual): Base para a comunicação da apertadeira com o servidor ficando armazenados os apertos e mostrado se o aperto está OK ou NOT, utilizando o visor LCD como referência conforme Figura 5.

Figura 5 – Estação virtual

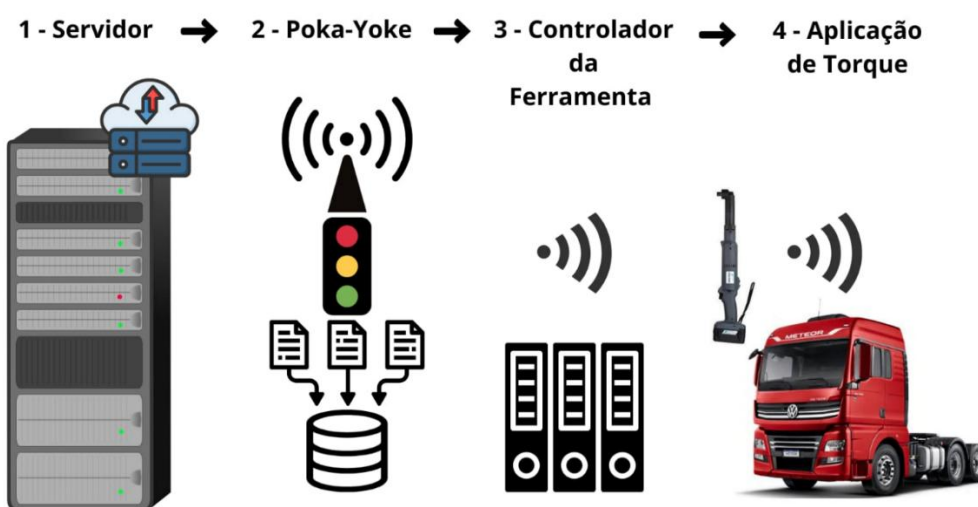


Fonte: Atlas Copco, 2025

Sendo no visor onde os dados serão mostrados ao operador. E baseando-se no treinamento interno, ele será liberado para fazer a operação.

4. Aplicação de torque: Processo onde o operador irá fazer o aperto nas fixações e pelo sistema de poka Yoke analisar se o torque está conforme, como visto na Figura 6.

Figura 6 – Processo de Aperto



Fonte: Autores, 2025

A proposta de utilização de um sistema de aperto eletrônico é rastreável na coleta de dados visa realizar a rastreabilidade do torque de fixação das cabines, e aumentar a precisão dos apertos, integrando os sistemas e otimizando os processos de coleta de torque, com uma plataforma de interação baseado na Manufatura 4.0 e na IoT.

A Figura 7 mostra a comparação entre os dois processos:

Figura 7 – Comparação entre os processos

FUNÇÕES	APERTADEIRA PNEUMÁTICA	APERTADEIRA ELETRÔNICA
Análise de Dados		
Monitoramento em Tempo Real		
Digitalização do Processo		
Rastreabilidade		
Precisão no Aperto		

Fonte: Autores, 2025

Vantagens do método da utilização do sistema de aperto:

- Análise de dados: resposta rápida para falhas e tendências de apertos irregulares.
- Monitoramento em tempo real: acompanhamento dos apertos e melhor visualização para o operador.
- Digitalização do Processo: eliminação de papel e melhor forma para o arquivamento de dados.
- Rastreabilidade: histórico completo dos apertos por data.
- Precisão no aperto: melhor controle para ajuste e ergonomia na operação.

Diante disso, a proposta passou por etapas de aprovação, como:

- Análise de Viabilidade do processo.
- *Follow up* com compras para a aquisição dos equipamentos.
- Adequação da área para o uso do equipamento.
- Instalações dos softwares.
- Teste de rastreabilidade e de aperto.
- Treinamento dos operadores.
- Implementação.

4.3 Resultados após a implantação do novo sistema de aperto

Na primeira fase, foi realizada uma análise baseada no indicador de qualidade, conforme o comparativo entre os Quadros 1 e 2, sendo evidenciado o impacto gerado através da integração virtual, ação de pátio e reclamação de clientes.

Quadro 1 – Indicadores de Qualidade Processo Atual

INDICADOR DE QUALIDADE	
SOFTWARE E HARDWARE	NÃO HÁ INTEGRIDADE ENTRE OS DADOS DE QUALIDADE E PRODUÇÃO
	DEMORA PARA EMISSÃO DE ALERTAS EM CASO DE NÃO CONFORMIDADE
	BAIXA PRECISÃO DOS VALORES COLETADOS +/- 15%
	POSSIBILIDADE DE ERRO OPERACIONAL
AÇÃO DE PÁTIO	12 OCORRÊNCIAS NOS ANOS DE 2021 E 2022
ABERTURA DE SAQ	15 RECLAMAÇÕES DE CLIENTES NOS ANOS DE 2021 E 2022

Quadro 2 – Indicadores de Qualidade Processo Proposto

INDICADOR DE QUALIDADE	
SOFTWARE E HARDWARE	TOTAL INTEGRIDADE ENTRE OS DADOS DE QUALIDADE E PRODUÇÃO
	ALERTAS AUTOMATICOS EM CASO DE NÃO CONFORMIDADE
	ALTA PRECISÃO DOS VALORES COLETADOS +/- 0,05%
	BAIXA POSSIBILIDADE DE ERRO OPERACIONAL
AÇÃO DE PÁTIO	0 OCORRÊNCIAS NOS ANOS DE 2021 E 2022
ABERTURA DE SAQ	0 RECLAMAÇÕES DE CLIENTES NOS ANOS DE 2021 E 2022

Fonte: Autores, 2025

Como visto nos Quadros 1 e 2, houve uma melhora significativa com a implementação do modelo proposto.

Na segunda fase, foi feita a análise baseado no indicador de custos, conforme Quadros 3 e 4.

Quadro 3 – Indicadores de Custos Processo Atual

INDICADOR DE CUSTO	
QUANTIDADE DE COLABORADORES	CINCO INSPETORES PARA A REALIZAÇÃO DA ATIVIDADE, SENDO TRÊS NO PRIMEIRO TURNO E DOIS NO SEGUNDO TURNO
AÇÃO DE PÁTIO	ALTO VALOR PARA OS RETRABALHOS DAS AÇÕES DE PÁTIO
PAPÉIS ARMAZENADOS	163 FOLHAS UTILIZADAS TODOS OS DIAS

Quadro 4 – Indicadores de Custos Processo Proposto

INDICADOR DE CUSTO	
QUANTIDADE DE COLABORADORES	REDUÇÃO PARA 02 INSPETORES PARA A REALIZAÇÃO DA ATIVIDADE, SENDO 01 NO PRIMEIRO TURNO E 01 NO SEGUNDO TURNO
AÇÃO DE PÁTIO	ZERADO O VALOR DAS AÇÕES DE PÁTIO NO ANO 2021 E 2022
PAPÉIS ARMAZENADOS	ZERADO O NÚMERO DE FOLHAS USADOS NESSE PROCESSO

Fonte: Autores, 2025

Foi evidenciado que o impacto gerado através do custo com ação de pátio, diminuição dos colaboradores de qualidade no processo e custo com impressão de folhas e a logística de armazenamento dos arquivos, diminuíram de forma significativa.

Na última fase, foi feita a análise baseado no indicador de tempo, conforme os Quadros 5 e 6 e foi possível por meio da crono análise a identificação do gasto que o operador tem por dia para realizar o aperto com a apertadeira pneumática.

Quadro 5 – Indicadores de Tempo Ciclo Processo Atual

INDICADOR DE TEMPO	
COLETA DE TORQUE	TEMPO CICLO DO PROCESSO DE 1 MINUTO
RETRABALHO E REPARO	50 HORAS DE RETRABALHO NA FUNILARIA (MÊS)

Quadro 6 – Indicadores de Tempo Ciclo Processo Proposto

INDICADOR DE TEMPO	
COLETA DE TORQUE	TEMPO CICLO DO PROCESSO DE 25 SEGUNDOS
RETRABALHO E REPARO	03 HORAS DE RETRABALHO NA FUNILARIA (MÊS)

Fonte: Autores, 2025

Conforme a implementação do processo atual, houve uma melhora no tempo ciclo do processo e do tempo de retrabalho de peças.

5. Discussão de resultados

Segundo Lee et al. (2018) pode-se considerar o processo de manufatura automotiva, no qual a integração da Internet das Coisas (IoT) permite conectar máquinas, sensores e linhas de montagem em uma rede inteligente. Essa conectividade possibilita o monitoramento contínuo de parâmetros críticos como já citado no artigo. Ao serem analisados em tempo real por sistemas integrados, esses dados fornecem ganhos expressivos, como redução de paradas de linhas não planejadas, otimização do uso de recursos materiais e humanos, melhoria da eficiência energética e aumento da previsibilidade de falhas.

Existem vários critérios de como o uso da IoT influencia de forma positiva na melhoria de eficiência operacional, melhoria da qualidade e controle do processo, contribui para a manutenção preditiva. Ferrisi (2025) mostra a importância do uso da IoT na manutenção preditiva em processos de usinagem e como esta tecnologia desempenha um papel fundamental no avanço dos objetivos de sustentabilidade da I5.0. Judijanto, Yulistiyono e Febriyanto (2024) sugerem que os fabricantes devem dar prioridade tanto à infraestrutura digital como às aplicações IoT para aumentar a eficiência, a segurança e a sustentabilidade. Estes autores apontam que IoT + *big data* + conectividade permitem controle mais fino dos processos produtivos.

Sob essa perspectiva, os ganhos de eficiência observados no I4.0 devem ser reinterpretados à luz de novos paradigmas, em que a tecnologia atua como suporte para o desenvolvimento de competências e não como substituto da força humana, mas sim, de uma manufatura mais inteligente, inclusiva e sustentável (Qureshi et al. 2025).

Como resultado do trabalho também foi observado o início da implantação da I5.0 impactando a melhoria da eficiência energética e o aprimoramento da força de trabalho se integrando com a conectividade das novas tecnologias. Isto significa uma colaboração homem-máquina mais próxima. Sistemas ciber-físicos com IoT permitem que humanos interajam em tempo real e com segurança com máquinas inteligentes, robôs colaborativos. Rožanec et al. (2022) propõe modelos que priorizam confiança, explicabilidade, feedback humano.

Uso de IoT para monitorar consumo de energia, emissões, gestão de resíduos, otimizar processos para menor impacto ambiental. Ferrisi (2025) analisa como sensores de áudio podem ser usados para aumentar a consciência sustentável na manufatura. Zulkifli e Wasesa (2024) destacam que IoT + IA são essenciais para operações que precisam reagir em tempo real a alterações, para sustentabilidade e resiliência. Este aspecto é muito importante em ambientes disruptivos (pandemias, variações de demanda, problemas de fornecimento), onde a IoT permite maior visibilidade, adaptação e resposta rápida.

Em Síntese, as transformações mostradas no artigo convergem com os princípios emergentes da I5.0 buscando reposicionar o indivíduo no centro dos processos produtivos. Diferentemente da Indústria 4.0, centrada na automação e eficiência, a I5.0 valoriza a colaboração homem–máquina, a sustentabilidade socioambiental.

6. Considerações finais

A adoção das tecnologias da I4.0 no processo de juntas aparafusadas mostrou-se uma solução eficaz para superar limitações do método atual, trazendo ganhos significativos em qualidade, custos, tempo e segurança. A integração de sistemas, baseada em IoT e digitalização, possibilitou a rastreabilidade dos apertos, o monitoramento em tempo real e maior precisão operacional, eliminando falhas críticas e reduzindo riscos à confiabilidade do produto e à segurança.

Além dos resultados práticos observados na linha de produção automotiva estudada, este trabalho reforça o potencial transformador da Manufatura 4.0, ao demonstrar como soluções tecnológicas simples podem gerar impactos expressivos na eficiência e sustentabilidade dos processos. A redução no uso de papel, a otimização dos recursos e a melhoria na ergonomia operacional evidenciam também benefícios ambientais e sociais, alinhando-se às perspectivas emergentes da I5.0, que valoriza a colaboração humano-máquina e a sustentabilidade.

Dessa forma, conclui-se que a implementação de sistemas inteligentes de monitoramento e integração em processos produtivos não apenas aumenta a competitividade e a confiabilidade industrial, mas também aponta caminhos para uma manufatura mais



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

sustentável, segura e centrada no ser humano, visando a continuidade da análise do impacto das novas tecnologias da I4.0 e I5.0 constantemente em desenvolvimento baseando-se na melhoria contínua do processo, sustentabilidade e na melhor relação entre o ser humano e a tecnologia.

Como proposta de trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do estudo para outras linhas de produção e setores industriais, avaliando o impacto da integração IoT em indicadores de sustentabilidade produtividade e impactos sociais.

REFERÊNCIAS:

ADEL, A. *Future of Industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas*. *Journal of Cloud Computing (Heidelberg)*, v. 11, n. 1, p. 40, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00314-5>.

AMARAL, L. A. N. *Complex Networks: The Structure of Big Systems*. Princeton: Princeton University Press, 2016.

BAI, C.; SARKIS, J.; DOU, Y. *Smart Manufacturing and Intelligent Manufacturing: A Comparative Review*. *Engineering*, v. 6, n. 5, p. 563–574, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.017>.

BERG, H. et al. *Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production*. European Environment Agency, 2021. Disponível em: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production/@@download/file/Final%20for%20website.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

BETTIOL, M.; ALMEIDA, F.; RODRIGUES, P. *TICs e Indústria 4.0: impactos na transformação digital e competitividade*. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 26, n. 4, p. 78–97, 2022.

BIRKEL, H. S. et al. *Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers*. *Sustainability*, v. 11, n. 2, p. 384, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020384>.

BLICHFELDT, B. S.; FAULLANT, R. *Os impactos da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 nas empresas europeias*. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 25, n. 3, p. 1–24, 2021. Disponível em: https://sigarra.up.pt/fep/en/pub_geral.show_file?pi_doc_id=424033. Acesso em: 13 set. 2025.

BROCHADO, A. F.; ROCHA, E. M.; ALMEIDA, D. *Os impactos da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 nas empresas europeias. Revista de Administração Contemporânea*, v. 25, n. 3, p. 124, 2021. Disponível em: https://sigarra.up.pt/fep/en/pub_geral.show_file?pi_doc_id=424033. Acesso em: 13 set. 2025.

CHEN, M.; MAO, S.; LIU, Y. *Big Data: A Survey. Mobile Networks and Applications*, v. 19, p. 171–209, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11036-013-0489-0>.

COELHO, P. R. et al. *Avaliar o nível de maturidade/prontidão para Indústria 4.0: estudo de caso em um centro de distribuição de medicamentos na Baixada Fluminense/RJ. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 18, n. 2, p. 1–20, 2022. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/83114/1/Pericles%20Rezende%20Coelho.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

CUI, Y. et al. *RFID-based manufacturing process management system: A review. Journal of Manufacturing Systems*, v. 45, p. 1–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.03.003>.

DALENOGARE, L. S.; BENITEZ, G. B.; AYALA, N. F.; FRANK, A. G. *The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. International Journal of Production Economics*, v. 204, p. 383–394, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>.

EUROPEAN COMMISSION. *Sustainable development in the European Union: Monitoring report on progress towards the SDGs in an EU context — 2021 edition*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021.

FERRISI, S. *Sustainability Awareness in Manufacturing: A Review of IoT Audio Sensor Applications in the Industry 5.0 Era. Sensors*, v. 25, n. 3041, p. 1–35, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25103041>.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. *Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. International Journal of Production Economics*, v. 210, p. 15–26, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>.

GONÇALVES, R. A. *Adoção de tecnologias de informação e comunicação na Indústria 4.0: um estudo no contexto brasileiro. Revista Gestão & Tecnologia*, v. 24, n. 3, p. 112–135, 2024.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design principles for Industrie 4.0 scenarios*. 2016.

HOZDIĆ, E. *Smart factory for industry 4.0: A review. International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, v. 2, n. 1, p. 2067–3604, 2015.

JUDIJANKO, A. et al. *Bibliometric Analysis on the Application of Artificial Intelligence in Smart Manufacturing System in Industry 4.0*. [S.l.: s.n.], 2024.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. National Academy of Science and Engineering, 2013.

MAIA, L. F. *Aplicação de TICs para comunicação em tempo real na Indústria 4.0: estudo de caso no setor de saneamento. Revista Brasileira de Engenharia de Produção*, v. 12, n. 1, p. 55–70, 2023.

MARGHERITA, E. G.; BACCINI, A. M. *Exploring the socio-technical interplay of Industry 4.0: a single case study of an Italian manufacturing organisation. arXiv*, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2101.05665>. Acesso em: 13 set. 2025.

NAKAMURA, S. et al. *Industry 5.0: A human-centric solution for sustainable development. Journal of Manufacturing Systems*, v. 62, p. 196–210, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.010>.

ÖZTEMEL, E.; GÜRSEV, S. *Literature review of Industry 4.0 and related technologies. Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 31, n. 1, p. 127–182, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>.

QURESHI, K. M. et al. *Analysing Lean 4.0 adoption factors towards manufacturing sustainability in SMEs: A hybrid ANN-Fuzzy ISM framework. Scientific Reports*, v. 15, n. 17265, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01076-1>.

ROŽANEC, J. M. et al. *Human-Centric Artificial Intelligence Architecture for Industry 5.0 Applications. Journal of Industrial Information Integration*, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2203.10794>. Acesso em: 16 out. 2025.

RÜßMANN, M. et al. *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Boston: Boston Consulting Group, 2015.

SACOMANO, J. B.; SATYRO, R. *Tecnologias de Informação e Comunicação na Indústria 4.0: integração e automação de processos produtivos. Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 5, n. 2, p. 45–58, 2018.

SANTOS, A. S.; MANHÃES, T. A.; LIMA, R. S. *Indústria 4.0: conceitos e fundamentos. Revista Produção e Desenvolvimento*, 2018.

SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2016.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

SEBASTIAN, M. et al. *A survey on human machine interaction in Industry 4.0*. *ACM Computing Surveys*, v. 1, n. 1, p. 1–45, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/1122445.1122456>.

SOTOLANI, R. S. et al. *Vulnerabilidades de segurança da informação na Indústria 4.0: proposição de critérios para o uso de análise multicritério*. *Exacta*, v. 22, n. 2, p. 491–522, 2024.

SURIYANKIETKAEW, S.; PETISON, P. *A retrospective and foresight: Bibliometric review of international research on strategic management for sustainability, 1991–2019*. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 1, p. 1–27, 2020.

ULKIFLI, A.; WASESA, M. *Industry 5.0 research in the sustainable information systems sector: a scoping review analysis*. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, Bandung, v. 5, n. 2, p. 136–156, out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.59395/ijadis.v5i2.1336>. Disponível em: <http://ijadis.org>. Acesso em: 17 out. 2025.

WAMBA, S. F. et al. *How “big data” can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study*. *International Journal of Production Economics*, v. 165, p. 234–246, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.031>.