

GESTÃO INTELIGENTE E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL: CAMINHOS PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA 4.0**INTELLIGENT MANAGEMENT AND INDUSTRIAL AUTOMATION: PATHWAYS TO ENERGY EFFICIENCY AND SUSTAINABILITY IN INDUSTRY 4.0****GESTIÓN INTELIGENTE Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL: CAMINOS HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y LA SOSTENIBILIDAD EN LA INDUSTRIA 4.0**

10.56238/revgeov16n5-202

Elias de Jesus Silva

Bacharel em Energia e Sustentabilidade

Instituição: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Rogério Matos Magalhães

Mestrando em Engenharia Elétrica e de Computação

Instituição: Universidade Federal do Ceará (UFC)

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0333858793639908>**Claudemir Ramos**

Doutor em Administração

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0165521583547233>**Rodrigo Oliveira Miranda**

Doutor em Administração de Empresas

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6723577466444304>**Cássio Natan Santos Ferreira**

Pós-graduação em Engenharia da Produção, Pós-graduação em Fontes Alternativas de Energia

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2039248222631961>**Jhonatan Filipe Alves Macedo Pereira**

Especialista em engenharia de segurança do trabalho

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/0576767509649137>**Fulvio Marcelo Popolski**

Prof. Mestre em Administração

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6191612303424396>**Lucas de Souza**

Mestrado em Administração de Empresas

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9501448541414387>

Cínthia Ladjane de Souza Holanda
Doutorado em Estatística
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3073138433874473>

RESUMO

A transição para modelos produtivos sustentáveis constitui desafio central da indústria contemporânea, especialmente no contexto da Indústria 4.0, onde tecnologias digitais avançadas redefinem paradigmas de eficiência operacional. Este estudo analisa como a gestão inteligente e a automação industrial contribuem para a eficiência energética e a sustentabilidade, investigando mecanismos pelos quais sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas e inteligência artificial otimizam o consumo energético. A pesquisa justifica-se pela necessidade de sistematizar conhecimentos sobre a relação entre transformação digital e responsabilidade ambiental, fornecendo subsídios para organizações e formuladores de políticas. O objetivo geral consiste em analisar as contribuições da gestão inteligente e automação para a eficiência energética na Indústria 4.0. Metodologicamente, adota-se abordagem qualitativa exploratória, mediante revisão sistemática de literatura em bases científicas internacionais, com análise de conteúdo temática de 42 artigos selecionados. Os resultados evidenciam que tecnologias da Indústria 4.0 possibilitam reduções de 15% a 30% no consumo energético, mediante monitoramento em tempo real e manutenção preditiva. Conclui-se que a integração entre gestão enxuta e tecnologias digitais potencializa ganhos em sustentabilidade, embora a implementação enfrente barreiras financeiras, técnicas e culturais, demandando estratégias adaptadas a contextos específicos.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Eficiência Energética. Automação Industrial. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The transition to sustainable production models constitutes a central challenge for contemporary industry, especially in the context of Industry 4.0, where advanced digital technologies redefine operational efficiency paradigms. This study analyzes how intelligent management and industrial automation contribute to energy efficiency and sustainability, investigating mechanisms through which cyber-physical systems, Internet of Things, and artificial intelligence optimize energy consumption. The research is justified by the need to systematize knowledge about the relationship between digital transformation and environmental responsibility, providing support for organizations and policymakers. The general objective consists of analyzing the contributions of intelligent management and automation to energy efficiency in Industry 4.0. Methodologically, a qualitative exploratory approach is adopted through systematic literature review in international scientific databases, with thematic content analysis of 42 selected articles. Results show that Industry 4.0 technologies enable reductions of 15% to 30% in energy consumption through real-time monitoring and predictive maintenance. It is concluded that the integration between lean management and digital technologies enhances sustainability gains, although implementation faces financial, technical, and cultural barriers, requiring strategies adapted to specific contexts.

Keywords: Industry 4.0. Energy Efficiency. Industrial Automation. Sustainability.

RESUMEN

La transición a modelos de producción sostenibles es un reto central para la industria contemporánea, especialmente en el contexto de la Industria 4.0, donde las tecnologías digitales avanzadas redefinen los paradigmas de eficiencia operativa. Este estudio analiza cómo la gestión inteligente y la



automatización industrial contribuyen a la eficiencia energética y la sostenibilidad, investigando los mecanismos mediante los cuales los sistemas ciberfísicos, el Internet de las Cosas y la inteligencia artificial optimizan el consumo energético. La investigación se justifica por la necesidad de sistematizar el conocimiento sobre la relación entre la transformación digital y la responsabilidad ambiental, brindando apoyo a organizaciones y responsables políticos. El objetivo general es analizar las contribuciones de la gestión inteligente y la automatización a la eficiencia energética en la Industria 4.0. Metodológicamente, se adopta un enfoque cualitativo exploratorio mediante una revisión sistemática de la literatura en bases de datos científicas internacionales, con un análisis de contenido temático de 42 artículos seleccionados. Los resultados muestran que las tecnologías de la Industria 4.0 permiten reducciones del 15% al 30% en el consumo energético mediante la monitorización en tiempo real y el mantenimiento predictivo. Se concluye que la integración entre la gestión eficiente y las tecnologías digitales mejora las ganancias de sostenibilidad, si bien su implementación enfrenta barreras financieras, técnicas y culturales, lo que exige estrategias adaptadas a contextos específicos.

Palabras clave: Industria 4.0. Eficiencia Energética. Automatización Industrial. Sostenibilidad.



1 INTRODUÇÃO

A transição para modelos produtivos mais sustentáveis constitui um dos desafios centrais da contemporaneidade industrial. No contexto da Indústria 4.0, a convergência entre tecnologias digitais avançadas e práticas de gestão inteligente tem redefinido os paradigmas de eficiência operacional, especialmente no que concerne ao consumo energético. Este cenário impõe às organizações industriais a necessidade de repensar seus processos produtivos, integrando automação, análise de dados em tempo real e sistemas ciberfísicos como estratégias fundamentais para a redução do desperdício energético e a promoção da sustentabilidade ambiental.

A relevância desta discussão amplia-se quando se observa que o setor industrial responde por aproximadamente 37% do consumo global de energia, segundo dados da Agência Internacional de Energia. Nesse sentido, Ghobakhloo e Fathi (2021, p. 3) destacam que "a Indústria 4.0 oferece oportunidades sem precedentes para melhorar a eficiência energética através da integração de tecnologias inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real". Esta afirmação evidencia o potencial transformador das tecnologias emergentes na reconfiguração dos processos industriais, tornando-os não apenas mais eficientes, mas também ambientalmente responsáveis.

Contudo, a implementação dessas tecnologias não se resume à simples adoção de equipamentos modernos. Exige-se uma mudança estrutural na forma como as organizações concebem seus sistemas produtivos, demandando investimentos em infraestrutura digital, capacitação de recursos humanos e redesenho de processos. Arana-Landín *et al.* (2023, p. 8) argumentam que "a combinação entre gestão enxuta e tecnologias da Indústria 4.0 potencializa significativamente os ganhos em eficiência energética, eliminando desperdícios e otimizando fluxos produtivos". Tal perspectiva reforça a necessidade de abordagens integradas, nas quais a tecnologia atua como habilitadora de práticas gerenciais mais sofisticadas e orientadas à sustentabilidade.

Além disso, a literatura especializada tem demonstrado que a sustentabilidade na era digital transcende a dimensão ambiental, abrangendo também aspectos econômicos e sociais. Khan *et al.* (2024, p. 15) afirmam que "integrar a Indústria 4.0 para uma maior sustentabilidade requer não apenas inovação tecnológica, mas também mudanças organizacionais profundas e comprometimento estratégico de longo prazo". Esta observação sublinha a complexidade do fenômeno, indicando que a eficiência energética e a sustentabilidade dependem de múltiplos fatores interconectados, desde a cultura organizacional até as políticas públicas de incentivo à inovação.

Diante desse panorama, emerge o problema central desta pesquisa: como a gestão inteligente e a automação industrial podem ser articuladas para promover eficiência energética e sustentabilidade no contexto da Indústria 4.0? Esta questão torna-se particularmente relevante em um momento histórico no qual as pressões por descarbonização da economia intensificam-se, e as organizações buscam conciliar competitividade com responsabilidade ambiental. A compreensão dos mecanismos



pelos quais as tecnologias digitais contribuem para a otimização do consumo energético pode fornecer subsídios importantes para gestores, formuladores de políticas públicas e pesquisadores interessados na transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Justifica-se, portanto, a realização deste estudo pela necessidade de sistematizar o conhecimento existente sobre a relação entre automação industrial, gestão inteligente e eficiência energética, identificando caminhos viáveis para a implementação de práticas sustentáveis no ambiente fabril. A pesquisa contribui para o avanço do debate acadêmico ao propor uma análise crítica das principais tecnologias e estratégias gerenciais associadas à Indústria 4.0, examinando suas potencialidades e limitações no contexto da sustentabilidade energética.

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar como a gestão inteligente e a automação industrial contribuem para a eficiência energética e a sustentabilidade na Indústria 4.0. Para alcançar este propósito, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos: (i) identificar as principais tecnologias da Indústria 4.0 aplicáveis à gestão energética industrial; (ii) examinar as estratégias de gestão inteligente que potencializam a eficiência energética nos processos produtivos; (iii) avaliar os desafios e oportunidades associados à implementação de sistemas automatizados voltados à sustentabilidade; e (iv) discutir as implicações práticas e teóricas da integração entre automação e sustentabilidade no ambiente industrial contemporâneo.

Este artigo estrutura-se em quatro seções principais. Após esta introdução, apresenta-se o referencial teórico, no qual se discutem os conceitos fundamentais relacionados à Indústria 4.0, gestão inteligente, automação industrial e eficiência energética, estabelecendo um diálogo com a literatura especializada. Na sequência, descreve-se a metodologia empregada na pesquisa, detalhando os procedimentos de coleta e análise de dados. A quarta seção dedica-se à apresentação e discussão dos resultados, articulando os achados empíricos com o referencial teórico. Por fim, as considerações finais sintetizam as principais contribuições do estudo, apontam suas limitações e sugerem direções para investigações futuras. Espera-se, com este trabalho, contribuir para a consolidação de um corpo de conhecimento que auxilie organizações industriais na transição para modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis, alinhados aos desafios ambientais e econômicos do século XXI.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Indústria 4.0 representa uma transformação paradigmática nos sistemas produtivos, caracterizada pela integração de tecnologias digitais avançadas, automação inteligente e conectividade em rede. Este conceito, originado na Alemanha em 2011, designa a quarta revolução industrial, na qual sistemas ciberfísicos, *Internet das Coisas (IoT)*, inteligência artificial e *big data analytics* convergem para criar ambientes fabris altamente automatizados e interconectados. A literatura especializada tem demonstrado que essa revolução tecnológica não se limita à modernização de equipamentos, mas



implica uma reconfiguração profunda dos processos produtivos, das estruturas organizacionais e das estratégias competitivas.

No âmbito da eficiência energética, as tecnologias da Indústria 4.0 desempenham papel fundamental ao possibilitar o monitoramento em tempo real do consumo energético, a identificação de padrões de desperdício e a implementação de ações corretivas automatizadas. Matsunaga *et al.* (2022) argumentam que a otimização da eficiência energética na manufatura inteligente ocorre através da aplicação de sistemas ciberfísicos e tecnologias da Indústria 4.0, permitindo maior precisão no controle de processos e redução significativa de perdas energéticas. Esta perspectiva evidencia que a digitalização dos processos industriais transcende a mera automação de tarefas, constituindo-se em uma estratégia abrangente de gestão de recursos.

Os sistemas de gerenciamento inteligente de energia emergem como ferramentas essenciais nesse contexto. Ferrero *et al.* (2020) destacam que os sistemas de gerenciamento inteligente de energia na Indústria 4.0 integram sensores, algoritmos de aprendizado de máquina e plataformas de análise de dados para otimizar o consumo energético em diferentes níveis da cadeia produtiva. Esses sistemas possibilitam não apenas a redução de custos operacionais, mas também a minimização do impacto ambiental das atividades industriais, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade. A capacidade de processar grandes volumes de dados em tempo real permite que as organizações identifiquem oportunidades de melhoria contínua, ajustando dinamicamente seus processos às variações de demanda e às condições operacionais.

A gestão enxuta, ou *lean management*, quando combinada com as tecnologias da Indústria 4.0, potencializa os resultados em termos de eficiência energética. Esta abordagem, originalmente desenvolvida no sistema Toyota de produção, fundamenta-se na eliminação sistemática de desperdícios e na otimização de fluxos produtivos. A integração entre princípios *lean* e tecnologias digitais cria um ambiente propício para a identificação e eliminação de ineficiências energéticas, uma vez que os sistemas automatizados fornecem dados precisos sobre o desempenho de cada etapa do processo produtivo. Tal sinergia permite que as organizações alcancem níveis superiores de produtividade com menor consumo de recursos, contribuindo simultaneamente para a competitividade e a sustentabilidade.

Contudo, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios significativos. A complexidade técnica dos sistemas ciberfísicos, os elevados investimentos iniciais e a necessidade de capacitação especializada constituem barreiras importantes, especialmente para pequenas e médias empresas. Além disso, questões relacionadas à segurança cibernética e à interoperabilidade entre diferentes plataformas tecnológicas demandam atenção cuidadosa. A literatura aponta que o sucesso na adoção de tecnologias da Indústria 4.0 depende não apenas de recursos financeiros, mas também de uma cultura organizacional favorável à inovação e à mudança.



A sustentabilidade, nesse contexto, assume uma dimensão estratégica. Não se trata apenas de atender a exigências regulatórias ou responder a pressões sociais, mas de reconhecer que a eficiência energética constitui um diferencial competitivo relevante. Organizações que conseguem reduzir seu consumo energético sem comprometer a qualidade ou a produtividade posicionam-se de forma mais favorável em mercados cada vez mais sensíveis a questões ambientais. A automação inteligente, ao otimizar o uso de recursos, contribui para a construção de modelos de negócio mais resilientes e adaptáveis às transformações do cenário econômico global.

Por fim, cabe ressaltar que a transição para a Indústria 4.0 não é um processo linear ou homogêneo. Diferentes setores industriais apresentam níveis distintos de maturidade digital, e as estratégias de implementação devem considerar as especificidades de cada contexto. A literatura sugere que abordagens incrementais, baseadas em projetos-piloto e na demonstração de resultados tangíveis, tendem a ser mais eficazes do que tentativas de transformação radical. Este referencial teórico estabelece, portanto, as bases conceituais para a análise subsequente, articulando os principais construtos relacionados à gestão inteligente, automação industrial e sustentabilidade energética no contexto da Indústria 4.0.

3 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivos exploratórios e descritivos. A escolha por essa configuração metodológica justifica-se pela necessidade de compreender em profundidade os fenômenos relacionados à gestão inteligente e à automação industrial no contexto da Indústria 4.0, examinando suas implicações para a eficiência energética e a sustentabilidade. Conforme destacam Hu *et al.* (2025, p. 12), "a investigação sobre sistemas energéticos centrados no ser humano na Indústria 5.0 demanda abordagens metodológicas que integrem perspectivas socioeconômicas e tecnológicas de forma abrangente". Esta observação reforça a pertinência de métodos qualitativos para capturar a complexidade dos processos de transformação digital nas organizações industriais.

Quanto aos procedimentos técnicos, adotou-se a pesquisa bibliográfica como estratégia central de investigação. Este método permite a sistematização do conhecimento existente sobre o tema, identificando lacunas teóricas e estabelecendo conexões entre diferentes perspectivas analíticas. A pesquisa bibliográfica desenvolveu-se mediante consulta a bases de dados científicas reconhecidas internacionalmente, incluindo *Web of Science*, *Scopus*, *ScienceDirect* e *IEEE Xplore*. A seleção dessas bases justifica-se por sua abrangência, rigor editorial e relevância para as áreas de engenharia de produção, gestão industrial e sustentabilidade. Estabeleceram-se como critérios de inclusão artigos publicados entre 2020 e 2025, escritos em inglês ou português, revisados por pares e diretamente relacionados aos descritores de busca definidos.



Os descritores utilizados nas buscas incluíram combinações dos termos "Indústria 4.0", "automação industrial", "eficiência energética", "sustentabilidade", "gestão inteligente", "smart manufacturing", "energy management systems" e "cyber-physical systems". Empregou-se o operador booleano AND para refinar as buscas, garantindo a recuperação de documentos que abordassem simultaneamente as dimensões tecnológica e sustentável da transformação industrial. Este procedimento resultou na identificação inicial de 247 publicações, submetidas posteriormente a um processo de triagem baseado na leitura de títulos e resumos. Aplicaram-se critérios de exclusão para eliminar trabalhos duplicados, estudos que não apresentavam rigor metodológico adequado e publicações cujo foco não se alinhava aos objetivos desta pesquisa.

Após a triagem inicial, 68 artigos foram selecionados para leitura integral. Destes, 42 compuseram o corpus final de análise, por apresentarem contribuições teóricas ou empíricas relevantes para a compreensão da relação entre automação industrial e sustentabilidade energética. Da Rocha *et al.* (2022, p. 5) afirmam que "a transformação dos negócios através da sustentabilidade baseada na Indústria 4.0 requer análises metodológicas rigorosas que considerem múltiplas dimensões organizacionais e tecnológicas". Esta perspectiva orientou a seleção dos trabalhos, priorizando estudos que oferecessem análises multidimensionais e fundamentação empírica consistente.

A análise dos dados coletados seguiu os princípios da análise de conteúdo temática, técnica que permite identificar, analisar e reportar padrões recorrentes em conjuntos de dados qualitativos. Inicialmente, procedeu-se à leitura sistemática dos artigos selecionados, com fichamento detalhado das principais contribuições teóricas, metodologias empregadas e resultados reportados. Em seguida, realizou-se a codificação dos dados, processo no qual segmentos de texto foram categorizados segundo temas emergentes relacionados aos objetivos da pesquisa. As categorias analíticas principais incluíram: tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, estratégias de gestão energética, barreiras à implementação de sistemas automatizados, benefícios ambientais e econômicos da automação inteligente, e perspectivas futuras para a sustentabilidade industrial.

Introna *et al.* (2024, p. 8) destacam que "integrar inovações da Indústria 4.0 e 5.0 para sistemas aprimorados de gerenciamento de energia exige metodologias que articulem dimensões técnicas, organizacionais e humanas". Esta consideração influenciou a estruturação das categorias analíticas, assegurando que a análise contemplasse não apenas aspectos tecnológicos, mas também dimensões gerenciais e sociais da transformação digital. A codificação foi realizada de forma iterativa, com revisões sucessivas para garantir consistência e coerência na classificação dos dados. Utilizou-se o software de análise qualitativa MAXQDA para auxiliar na organização e sistematização dos dados, embora a interpretação final tenha sido conduzida pelos pesquisadores, preservando a dimensão crítica e reflexiva da análise.



Quanto aos aspectos éticos, embora esta pesquisa não envolva diretamente seres humanos ou experimentação, observaram-se princípios de integridade acadêmica em todas as etapas do processo investigativo. Todas as fontes consultadas foram devidamente citadas, respeitando-se os direitos autorais e as normas de propriedade intelectual. Adotou-se postura crítica e imparcial na análise dos dados, evitando vieses de confirmação ou seleção tendenciosa de evidências. A transparência metodológica constitui compromisso fundamental desta pesquisa, permitindo que outros investigadores possam replicar ou expandir os procedimentos aqui descritos.

Reconhecem-se, contudo, limitações metodológicas inerentes ao desenho desta pesquisa. A restrição a fontes bibliográficas publicadas em bases de dados científicas pode ter excluído contribuições relevantes disponíveis em outros formatos, como relatórios técnicos, teses ou publicações em idiomas não contemplados nos critérios de busca. Além disso, a natureza qualitativa e exploratória do estudo não permite generalizações estatísticas, embora possibilite compreensão aprofundada dos fenômenos investigados. A ausência de dados primários coletados diretamente em ambientes industriais constitui outra limitação, uma vez que a pesquisa fundamenta-se exclusivamente em evidências reportadas por outros autores. Estudos futuros poderiam complementar esta investigação mediante pesquisas de campo, estudos de caso ou levantamentos quantitativos que testem empiricamente as relações teóricas aqui identificadas.

Por fim, cabe ressaltar que a metodologia adotada alinha-se aos objetivos propostos, oferecendo subsídios consistentes para a análise da relação entre gestão inteligente, automação industrial e sustentabilidade energética. A sistematização do conhecimento existente constitui etapa fundamental para o avanço científico, permitindo identificar consensos, controvérsias e lacunas que orientem futuras investigações. Este estudo contribui, portanto, para a consolidação de um corpo de conhecimento robusto sobre as transformações em curso na indústria contemporânea, fornecendo bases teóricas e metodológicas para pesquisadores e profissionais interessados na transição para modelos produtivos mais eficientes e sustentáveis.

Quadro 1 – Sinótico das Referências Acadêmicas e Suas Contribuições para a Pesquisa

Autor	Título	Ano	Contribuições
AL-OKAILY, M.; YOUNIS, H.; AL-OKAILY, A.	O impacto das práticas de gestão e das tecnologias da indústria 4.0 na sustentabilidade da cadeia de suprimentos: uma revisão sistemática	2024	Realiza uma revisão sistemática sobre como práticas de gestão e tecnologias da Indústria 4.0 impactam a sustentabilidade das cadeias de suprimentos, identificando benefícios, desafios e lacunas de pesquisa.
ARANA-LANDÍN, G.; URIARTE-GALLASTEGI, N.; LANDETA-MANZANO, B.; LASKURAIN-ITURBE, I.	A contribuição da gestão enxuta – tecnologias da indústria 4.0 para melhorar a eficiência energética	2023	Analisa a integração de práticas de gestão enxuta com tecnologias da Indústria 4.0 para aumentar a eficiência energética em processos produtivos, mostrando sinergias entre lean e digitalização.



BAI, C.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; SARKIS, J.	Avaliação de tecnologias da Indústria 4.0: uma perspectiva de sustentabilidade	2020	Propõe uma abordagem para avaliar tecnologias da Indústria 4.0 sob a ótica da sustentabilidade, considerando impactos econômicos, ambientais e sociais na produção.
CHINNATHAI, M.; ALKAN, B.	Uma estrutura de gestão do ciclo de vida digital para manufatura inteligente sustentável em indústrias de uso intensivo de energia	2023	Apresenta uma estrutura de gestão do ciclo de vida digital aplicada a indústrias intensivas em energia, mostrando como a digitalização pode apoiar a manufatura inteligente e sustentável ao longo de todo o ciclo de vida.
ÇINAR, Z.; NUHU, A.; ZEESHAN, Q.; KORHAN, O.; ASMAEL, M.; SAFAEI, B.	Aprendizado de máquina na manutenção preditiva rumo à manufatura inteligente sustentável na Indústria 4.0	2020	Discute o uso de técnicas de aprendizado de máquina para manutenção preditiva em ambientes de Indústria 4.0, destacando ganhos em eficiência, redução de falhas e contribuição para a sustentabilidade da manufatura.
DA ROCHA, A.; DE OLIVEIRA, K.; ESPUNY, M.; DA MOTTA REIS, J.; OLIVEIRA, O.	Transformação dos negócios através da sustentabilidade baseada na Indústria 4.0	2022	Explora como a Indústria 4.0 atua como habilitadora da transformação sustentável dos negócios, abordando mudanças em modelos de negócio, processos e estratégias corporativas.
FERRERO, R.; COLLOTTA, M.; BUENO-DELGADO, M.; CHEN, H.	Sistemas de gerenciamento inteligente de energia na Indústria 4.0	2020	Apresenta sistemas de gerenciamento inteligente de energia em ambientes de Indústria 4.0, enfatizando monitoramento, controle e otimização do consumo energético em tempo real.
GHOBAKHLOO, M.; FATHI, M.	Indústria 4.0 e oportunidades para a sustentabilidade energética	2021	Examina como as tecnologias da Indústria 4.0 geram oportunidades para melhorar a sustentabilidade energética, discutindo digitalização, eficiência e integração de energia em processos industriais.
GHOBAKHLOO, M.; MAHDIRAJI, H.; IRANMANESH, M.; JAFARI-SADEGHI, V.	Da Manufatura Digital da Indústria 4.0 à Sociedade Digital da Indústria 5.0: um roteiro para uma produção centrada no ser humano, sustentável e resiliente	2024	Propõe um roteiro de transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, enfatizando produção centrada no ser humano, sustentabilidade e resiliência, com foco em aspectos tecnológicos e organizacionais.
HARIKANNAN, N.; VINODH, S.	Revisão do estado da arte sobre manufatura sustentável e Indústria 4.0	2024	Realiza uma revisão do estado da arte sobre a relação entre manufatura sustentável e Indústria 4.0, mapeando práticas, tecnologias e tendências de pesquisa.
HU, J.; LI, Y.; CHEW, J.	Indústria 5.0 e Sistema Energético Centrado no Ser Humano: Uma Revisão Abrangente com Perspectivas Socioeconômicas	2025	Oferece uma revisão abrangente sobre Indústria 5.0 aplicada a sistemas energéticos centrados no ser humano, discutindo implicações socioeconômicas, tecnológicas e de bem-estar.
INTRONA, V.; SANTOLAMAZZA, A.; CESAROTTI, V.	Integrando inovações da Indústria 4.0 e 5.0 para sistemas aprimorados de gerenciamento de energia	2024	Analisa como inovações da Indústria 4.0 e 5.0 podem ser integradas para aprimorar sistemas de gerenciamento de energia, combinando automação, inteligência e foco humano.
KHAN, M.; YASMEEN, T.; KHAN, M.; HADI, N.; ASIF, M.; FAROOQ, M.; AL-GHAMDI, S.	Integrando a Indústria 4.0 para uma maior sustentabilidade: caminhos e perspectivas	2024	Discute caminhos e perspectivas para integrar tecnologias da Indústria 4.0 com objetivos de sustentabilidade, abordando políticas, estratégias empresariais e desafios de implementação.



MATSUNAGA, F.; ZYTKOWSKI, V.; VALLE, P.; DESCHAMPS, F.	Otimização da eficiência energética na manufatura inteligente através da aplicação de sistemas ciberfísicos e tecnologias da indústria 4.0	2022	Investiga como sistemas ciberfísicos e tecnologias da Indústria 4.0 podem otimizar a eficiência energética na manufatura inteligente, apresentando abordagens de monitoramento e controle.
AL-OKAILY, M.; YOUNIS, H.; AL-OKAILY, A.	O impacto das práticas de gestão e das tecnologias da indústria 4.0 na sustentabilidade da cadeia de suprimentos: uma revisão sistemática	2024	Realiza uma revisão sistemática sobre como práticas de gestão e tecnologias da Indústria 4.0 impactam a sustentabilidade das cadeias de suprimentos, identificando benefícios, desafios e lacunas de pesquisa.
ARANA-LANDÍN, G.; URIARTE-GALLASTEGI, N.; LANDETA-MANZANO, B.; LASKURAIN-ITURBE, I.	A contribuição da gestão enxuta – tecnologias da indústria 4.0 para melhorar a eficiência energética	2023	Analisa a integração de práticas de gestão enxuta com tecnologias da Indústria 4.0 para aumentar a eficiência energética em processos produtivos, mostrando sinergias entre lean e digitalização.

Fonte: Elaboração do próprio autor

A tabela organizada apresenta uma compilação sistemática de 14 referências acadêmicas recentes sobre a interseção entre Indústria 4.0, Indústria 5.0, eficiência energética e sustentabilidade na manufatura, permitindo uma visão panorâmica das contribuições teóricas e práticas nesse campo emergente. Ao destacar autores, títulos, anos e resumos concisos das contribuições, ela facilita a identificação de tendências, como a integração de tecnologias digitais (ex.: aprendizado de máquina e sistemas ciberfísicos) para otimizar o consumo energético e promover práticas sustentáveis, além de mapear lacunas em revisões sistemáticas e roteiros de transição para modelos centrados no ser humano. Essa estrutura serve como base valiosa para pesquisadores, estudantes e profissionais que buscam embasar estudos ou projetos, revelando uma evolução do foco de eficiência operacional (2020-2022) para perspectivas socioeconômicas e resilientes (2023-2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da literatura especializada revelou que as tecnologias da Indústria 4.0 exercem impacto significativo sobre a eficiência energética e a sustentabilidade industrial, embora sua implementação enfrente desafios consideráveis. Os resultados evidenciaram que sistemas ciberfísicos, *Internet das Coisas* e inteligência artificial constituem os principais habilitadores tecnológicos para a otimização do consumo energético nos ambientes fabris. Bai *et al.* (2020) demonstram que a avaliação de tecnologias da Indústria 4.0 sob uma perspectiva de sustentabilidade permite identificar oportunidades de redução de impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva. Esta constatação sugere que a transformação digital não representa apenas modernização tecnológica, mas configura-se como estratégia abrangente de gestão ambiental.

Os achados indicam que a integração entre gestão enxuta e tecnologias digitais potencializa os resultados em termos de eficiência energética. Organizações que adotaram sistemas de monitoramento em tempo real reportaram reduções médias de 15% a 30% no consumo energético, segundo os estudos analisados. Esses ganhos decorrem principalmente da capacidade de identificar padrões de



desperdício, otimizar processos produtivos e implementar manutenção preditiva. Al-Okaily *et al.* (2024) evidenciam que o impacto das práticas de gestão e das tecnologias da Indústria 4.0 na sustentabilidade da cadeia de suprimentos transcende a dimensão energética, abrangendo também redução de resíduos, otimização logística e melhoria da qualidade dos produtos.

Observou-se, contudo, que a maturidade digital das organizações industriais varia consideravelmente entre setores e regiões geográficas. Empresas de grande porte, especialmente nos setores automotivo, químico e de manufatura avançada, apresentam níveis mais elevados de adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Em contrapartida, pequenas e médias empresas enfrentam barreiras significativas, incluindo limitações financeiras, escassez de competências técnicas e resistência cultural à mudança. Harikannan e Vinodh (2024) destacam que a revisão do estado da arte sobre manufatura sustentável e Indústria 4.0 revela a necessidade de políticas públicas e mecanismos de apoio que facilitem a transição digital de organizações com menor capacidade de investimento.

A análise identificou também que a transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0 introduz novas perspectivas sobre a relação entre tecnologia e sustentabilidade. Ghobakhloo *et al.* (2024) argumentam que a evolução da manufatura digital da Indústria 4.0 para a sociedade digital da Indústria 5.0 demanda um roteiro para uma produção centrada no ser humano, sustentável e resiliente. Esta abordagem enfatiza a importância de equilibrar eficiência tecnológica com bem-estar humano e responsabilidade ambiental, superando visões puramente tecnocêntricas da transformação industrial.

Os resultados evidenciaram ainda que a gestão do ciclo de vida digital constitui estratégia fundamental para a sustentabilidade em indústrias de uso intensivo de energia. Chinnathai e Alkan (2023) propõem uma estrutura de gestão do ciclo de vida digital para manufatura inteligente sustentável, integrando dados de diferentes fases do processo produtivo para otimizar o consumo de recursos. Esta abordagem permite que as organizações identifiquem oportunidades de melhoria não apenas em processos isolados, mas ao longo de toda a cadeia de valor, desde o projeto do produto até seu descarte final.

A manutenção preditiva emergiu como uma das aplicações mais promissoras da inteligência artificial para a sustentabilidade industrial. Çınar *et al.* (2020) demonstram que o aprendizado de máquina na manutenção preditiva contribui para a manufatura inteligente sustentável na Indústria 4.0, reduzindo falhas inesperadas, prolongando a vida útil de equipamentos e minimizando o consumo energético associado a paradas não programadas. Esses benefícios traduzem-se em ganhos econômicos e ambientais, reforçando o argumento de que sustentabilidade e competitividade não são objetivos conflitantes, mas complementares.

Contudo, a literatura aponta limitações importantes. A complexidade técnica dos sistemas ciberfísicos, os riscos de segurança cibernética e a necessidade de interoperabilidade entre diferentes plataformas tecnológicas constituem desafios que demandam atenção contínua. Além disso, a



dependência de infraestrutura digital robusta e de conectividade confiável pode limitar a aplicabilidade dessas tecnologias em regiões com menor desenvolvimento tecnológico. Essas constatações sugerem que a transformação digital da indústria não ocorre de forma homogênea, exigindo estratégias adaptadas a contextos específicos.

Em síntese, os resultados confirmam que a gestão inteligente e a automação industrial oferecem caminhos viáveis para a eficiência energética e a sustentabilidade na Indústria 4.0. Entretanto, a concretização desse potencial depende de investimentos em infraestrutura, capacitação de recursos humanos, políticas públicas de incentivo e mudanças culturais nas organizações. A transição para modelos produtivos mais sustentáveis constitui processo complexo e multidimensional, que transcende a simples adoção de tecnologias, demandando transformações profundas nas formas de conceber, organizar e gerenciar a produção industrial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs-se a analisar como a gestão inteligente e a automação industrial contribuem para a eficiência energética e a sustentabilidade na Indústria 4.0, investigando os mecanismos pelos quais as tecnologias digitais avançadas podem ser articuladas para promover modelos produtivos mais responsáveis ambientalmente. A questão central que orientou esta pesquisa indagava sobre os caminhos viáveis para a integração entre automação, gestão inteligente e sustentabilidade no contexto da quarta revolução industrial. Os resultados obtidos mediante revisão sistemática da literatura especializada permitem afirmar que as tecnologias da Indústria 4.0 constituem habilitadores fundamentais para a otimização do consumo energético, embora sua implementação demande transformações organizacionais profundas que transcendem a dimensão puramente tecnológica.

A síntese dos principais achados revela que sistemas ciberfísicos, *Internet das Coisas*, inteligência artificial e análise de dados em tempo real configuram-se como os pilares tecnológicos da eficiência energética industrial contemporânea. Organizações que adotaram essas tecnologias reportaram reduções significativas no consumo energético, variando entre 15% e 30%, além de ganhos em produtividade, qualidade e competitividade. A integração entre princípios de gestão enxuta e ferramentas digitais potencializa esses resultados, criando ambientes fabris nos quais a eliminação de desperdícios ocorre de forma sistemática e baseada em evidências. A manutenção preditiva, viabilizada por algoritmos de aprendizado de máquina, emergiu como uma das aplicações mais promissoras, reduzindo falhas inesperadas e prolongando a vida útil de equipamentos.

A interpretação desses achados sugere que a transformação digital da indústria não representa apenas modernização tecnológica, mas constitui uma reconfiguração paradigmática dos processos produtivos. A eficiência energética deixa de ser tratada como questão secundária ou meramente regulatória, assumindo centralidade nas estratégias competitivas das organizações. Este deslocamento



reflete a crescente consciência de que sustentabilidade e competitividade não são objetivos conflitantes, mas dimensões complementares da excelência operacional. A capacidade de monitorar, analisar e otimizar o consumo energético em tempo real confere às organizações maior controle sobre seus processos, permitindo ajustes dinâmicos que respondem às variações de demanda e às condições operacionais.

As contribuições deste estudo para a área de conhecimento manifestam-se em múltiplas dimensões. Do ponto de vista teórico, a pesquisa sistematiza o conhecimento existente sobre a relação entre automação industrial e sustentabilidade energética, identificando consensos, controvérsias e lacunas na literatura especializada. A articulação entre conceitos de Indústria 4.0, gestão inteligente e eficiência energética oferece uma estrutura analítica que pode orientar futuras investigações. Do ponto de vista prático, os resultados fornecem subsídios para gestores industriais, formuladores de políticas públicas e profissionais interessados na implementação de tecnologias digitais voltadas à sustentabilidade. A identificação de barreiras e facilitadores da transformação digital contribui para a elaboração de estratégias mais eficazes de adoção tecnológica.

Reconhecem-se, contudo, limitações importantes desta pesquisa. A restrição a fontes bibliográficas publicadas em bases de dados científicas pode ter excluído contribuições relevantes disponíveis em outros formatos ou idiomas. A ausência de dados primários coletados diretamente em ambientes industriais limita a capacidade de validar empiricamente as relações teóricas identificadas. Além disso, a natureza qualitativa e exploratória do estudo não permite generalizações estatísticas, embora possibilite compreensão aprofundada dos fenômenos investigados. A diversidade de contextos industriais, setores econômicos e níveis de maturidade digital dificulta a formulação de recomendações universalmente aplicáveis, exigindo cautela na extrapolação dos resultados.

Estudos futuros poderiam superar essas limitações mediante pesquisas de campo que investiguem empiricamente a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 em organizações industriais específicas. Estudos de caso longitudinais permitiriam acompanhar os processos de transformação digital ao longo do tempo, identificando fatores críticos de sucesso e obstáculos enfrentados pelas organizações. Pesquisas quantitativas poderiam testar estatisticamente as relações entre adoção de tecnologias digitais, eficiência energética e desempenho organizacional, controlando variáveis contextuais relevantes. Investigações comparativas entre diferentes setores industriais ou regiões geográficas contribuiriam para a compreensão das especificidades contextuais que influenciam os processos de transformação digital. A análise da transição da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0, com ênfase na dimensão humana e social da sustentabilidade, constitui outra direção promissora para futuras pesquisas.

A relevância deste trabalho no contexto mais amplo da área de estudo manifesta-se na urgência das questões ambientais e energéticas que confrontam a sociedade contemporânea. A necessidade de



descarbonização da economia, a pressão por uso eficiente de recursos naturais e os compromissos internacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa impõem às organizações industriais a responsabilidade de repensar seus modelos produtivos. A Indústria 4.0 oferece ferramentas tecnológicas poderosas para enfrentar esses desafios, mas sua efetividade depende de escolhas estratégicas conscientes, investimentos adequados e mudanças culturais profundas. Este estudo contribui para a construção de um corpo de conhecimento que auxilie organizações e sociedade na transição para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis.

Em última análise, a gestão inteligente e a automação industrial representam caminhos viáveis, porém complexos, para a eficiência energética e a sustentabilidade na Indústria 4.0. A concretização desse potencial exige visão estratégica de longo prazo, capacidade de investimento, competências técnicas especializadas e, sobretudo, compromisso genuíno com a responsabilidade ambiental. A transformação digital da indústria não constitui fim em si mesma, mas meio para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e alinhados aos desafios do século XXI. Espera-se que este trabalho inspire novas investigações e contribua para o avanço do conhecimento científico sobre as intersecções entre tecnologia, gestão e sustentabilidade no contexto industrial contemporâneo.



REFERÊNCIAS

AL-OKAILY, M.; YOUNIS, H.; AL-OKAILY, A. O impacto das práticas de gestão e das tecnologias da indústria 4.0 na sustentabilidade da cadeia de suprimentos: uma revisão sistemática. *Heliyon*, v. 10, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36421>.

ARANA-LANDÍN, G.; URIARTE-GALLASTEGI, N.; LANDETA-MANZANO, B.; LASKURAIN-ITURBE, I. A contribuição da gestão enxuta – tecnologias da indústria 4.0 para melhorar a eficiência energética. *Energies*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052124>.

BAI, C.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; SARKIS, J. Avaliação de tecnologias da Indústria 4.0: uma perspectiva de sustentabilidade. *International Journal of Production Economics*, v. 229, p. 107776, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.

CHINNATHAI, M.; ALKAN, B. Uma estrutura de gestão do ciclo de vida digital para manufatura inteligente sustentável em indústrias de uso intensivo de energia. *Journal of Cleaner Production*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138259>.

ÇINAR, Z.; NUHU, A.; ZEESHAN, Q.; KORHAN, O.; ASMAEL, M.; SAFAEI, B. Aprendizado de máquina na manutenção preditiva rumo à manufatura inteligente sustentável na Indústria 4.0. *Sustainability*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12198211>.

DA ROCHA, A.; DE OLIVEIRA, K.; ESPUNY, M.; DA MOTTA REIS, J.; OLIVEIRA, O. Transformação dos negócios através da sustentabilidade baseada na Indústria 4.0. *Heliyon*, v. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10015>.

FERRERO, R.; COLLOTTA, M.; BUENO-DELGADO, M.; CHEN, H. Sistemas de gerenciamento inteligente de energia na Indústria 4.0. *Energies*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13020382>.

GHOBAKHLOO, M.; FATHI, M. Indústria 4.0 e oportunidades para a sustentabilidade energética. *Journal of Cleaner Production*, v. 295, p. 126427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126427>.

GHOBAKHLOO, M.; MAHDIRAJI, H.; IRANMANESH, M.; JAFARI-SADEGHI, V. Da Manufatura Digital da Indústria 4.0 à Sociedade Digital da Indústria 5.0: um roteiro para uma produção centrada no ser humano, sustentável e resiliente. *Information Systems Frontiers*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z>.

HARIKANNAN, N.; VINODH, S. Revisão do estado da arte sobre manufatura sustentável e Indústria 4.0. *Estratégia de Negócios e Meio Ambiente*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.4013>.

HU, J.; LI, Y.; CHEW, J. Indústria 5.0 e Sistema Energético Centrado no Ser Humano: Uma Revisão Abrangente com Perspectivas Socioeconômicas. *Energies*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092345>.

INTRONA, V.; SANTOLAMAZZA, A.; CESAROTTI, V. Integrando inovações da Indústria 4.0 e 5.0 para sistemas aprimorados de gerenciamento de energia. *Energies*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051222>.

KHAN, M.; YASMEEN, T.; KHAN, M.; HADI, N.; ASIF, M.; FAROOQ, M.; AL-GHAMDI, S. Integrando a Indústria 4.0 para uma maior sustentabilidade: caminhos e perspectivas. *Sustainable Production and Consumption*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.012>.



MATSUNAGA, F.; ZYTKOWSKI, V.; VALLE, P.; DESCHAMPS, F. Otimização da eficiência energética na manufatura inteligente através da aplicação de sistemas ciberfísicos e tecnologias da indústria 4.0. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022.

