

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE IOT NO MONITORAMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR METAL-MECÂNICO**ANALYSIS OF THE APPLICATION OF IOT IN THE MONITORING OF GREENHOUSE GASES IN THE METAL-MECHANICAL SECTOR**

Amanda Markus¹; Júlia Katiély dos Santos Wendling²; Andréa Quadrado Mussi³ e Thaísa Leal da Silva⁴

¹Mestranda em Arquitetura e Urbanismo, ATITUS Educação, Passo Fundo/RS, Brasil; amanda.markus1995@gmail.com

²Graduanda em Arquitetura e Urbanismo, ATITUS Educação, Passo Fundo/RS, Brasil. 1136642@atitus.edu.br

³Doutora em Arquitetura, ATITUS Educação, Passo Fundo/RS, Brasil. andrea.mussi@atitus.edu.br

⁴Doutora em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, ATITUS Educação, Passo Fundo/RS, Brasil. thaísa.silva@atitus.edu.br

Resumo: Os centros urbanos concentram grande parte das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), a partir de atividades provenientes da indústria, transporte motorizado e construção civil. Tais emissões têm se intensificado e gerado impactos ambientais severos, como o aquecimento global, e eventos climáticos extremos mais frequentes. Nesse contexto, a automação aplicada ao monitoramento de GEE surge como uma alternativa para otimizar o monitoramento de processos industriais e reduzir os gases gerados, fornecendo dados para a tomada de decisão. Este estudo tem como objetivo analisar como a aplicação da Internet das Coisas (IoT – Internet of Things) pode contribuir para o monitoramento e redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor metal-mecânico, promovendo maior eficiência energética e operacional. Trata-se de um ensaio teórico, com base em uma abordagem qualitativa, utilizando revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios técnicos e normas ambientais. O trabalho se insere no debate sobre sustentabilidade industrial, preenchendo uma lacuna teórica ao abordar a aplicação de IoT e estratégias de mitigação ambiental específicas para a indústria metal-mecânica. A partir dos resultados, foi possível perceber a importância do uso da IoT na coleta de dados em tempo real, otimizando o uso de energia e insumos, possibilitando a manutenção preditiva e facilitando o cumprimento de regulamentações ambientais, além de gerar vantagens competitivas às empresas. Por fim, este estudo contribui para a compreensão do papel da tecnologia no aprimoramento da gestão ambiental industrial, oferecendo subsídios para a construção de modelos sustentáveis baseados em dados e automação. Ressalta-se ainda que a aplicação de IoT no setor metal-mecânico pode reduzir a pegada de carbono e promover responsabilidade social ao tornar os processos industriais mais transparentes, seguros e sustentáveis.

Palavras chave: Internet das Coisas. Sustentabilidade. Emissões de Gases de Efeito Estufa. Indústria Metal-Mecânica.

Abstract: Urban centers account for a significant portion of global greenhouse gas (GHG) emissions from activities in industry, motorized transportation, and construction. These emissions have intensified, generating severe environmental impacts, such as global warming and more frequent extreme weather events. In this context, automation applied to GHG monitoring emerges as an alternative to optimize the monitoring of industrial processes and reduce the gases generated, providing data for decision-making. This study aims to

analyze how the application of the Internet of Things (IoT) can contribute to the monitoring and reduction of greenhouse gas (GHG) emissions in the metalworking sector, promoting greater energy and operational efficiency. This is a theoretical essay, based on a qualitative approach, utilizing a literature review of scientific articles, technical reports, and environmental standards. The work is part of the debate on industrial sustainability, filling a theoretical gap by addressing the application of IoT and specific environmental mitigation strategies for the metalworking industry. The results demonstrate the importance of using IoT to collect real-time data, optimizing energy and input usage, enabling predictive maintenance, and facilitating compliance with environmental regulations, in addition to generating competitive advantages for companies. Finally, this study contributes to understanding the role of technology in improving industrial environmental management, providing insights for building sustainable models based on data and automation. It is also noteworthy that applying IoT to the metalworking sector can reduce the carbon footprint and promote social responsibility by making industrial processes more transparent, safe, and sustainable.

Keywords: Internet of Things. Sustainability. Greenhouse Gas Emissions. Metal-Mechanical Industry..

Resumen: Los centros urbanos representan una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de las actividades industriales, el transporte motorizado y la construcción. Estas emisiones se han intensificado, generando graves impactos ambientales, como el calentamiento global y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos. En este contexto, la automatización aplicada al monitoreo de GEI surge como una alternativa para optimizar el monitoreo de los procesos industriales y reducir los gases generados, proporcionando datos para la toma de decisiones. Este estudio busca analizar cómo la aplicación del Internet de las Cosas (IdC) puede contribuir al monitoreo y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector metalmecánico, promoviendo una mayor eficiencia energética y operativa. Se trata de un ensayo teórico, basado en un enfoque cualitativo, que utiliza una revisión bibliográfica de artículos científicos, informes técnicos y normas ambientales. El trabajo se enmarca en el debate sobre la sostenibilidad industrial, abordando la aplicación del IdC y estrategias específicas de mitigación ambiental para la industria metalmecánica. Los resultados demuestran la importancia de utilizar el IdC para recopilar datos en tiempo real, optimizar el uso de energía e insumos, permitir el mantenimiento predictivo y facilitar el cumplimiento de la normativa ambiental, además de generar ventajas competitivas para las empresas. Finalmente, este estudio contribuye a comprender el papel de la tecnología en la mejora de la gestión ambiental industrial, aportando perspectivas para la construcción de modelos sostenibles basados en datos y automatización. Cabe destacar también que la aplicación del IoT al sector metalúrgico puede reducir la huella de carbono y promover la responsabilidad social al hacer que los procesos industriales sean más transparentes, seguros y sostenibles.

Palabras Clave: Internet de las cosas. Sostenibilidad. Emisiones de gases de efecto invernadero. Industria metalmecánica.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas configuram-se como um dos maiores desafios contemporâneos da humanidade, impulsionadas pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes de atividades industriais, agrícolas e energéticas (Aguiar et al., 2016; IPCC, 2021). O aquecimento global, resultado direto desse processo, tem provocado impactos ambientais severos, como o aumento da temperatura média do planeta, a intensificação de eventos climáticos extremos e a perda de biodiversidade. Diante desse cenário, torna-se urgente a adoção de tecnologias e estratégias na indústria que contribuam para mitigar as emissões e promover uma produção mais sustentável.

O setor metal-mecânico, responsável pela fabricação e transformação de metais utilizados em setores como o automotivo, aeronáutico, da construção civil e de manufatura, figura entre os principais emissores de GEE. Suas atividades consomem grandes quantidades de energia e matérias-primas, resultando em emissões diretas, provenientes da queima de combustíveis fósseis, e indiretas, associadas ao consumo energético. Assim, compreender e reduzir o impacto ambiental desse setor é fundamental para o alcance das metas globais de neutralidade de carbono.

Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) surge como uma ferramenta tecnológica inovadora capaz de transformar a gestão ambiental industrial. Sua aplicação permite o monitoramento em tempo real de equipamentos, processos e emissões, fornecendo dados precisos que auxiliam na tomada de decisões e no controle de desperdícios. A integração de sensores e sistemas inteligentes em máquinas e linhas de produção possibilita prever falhas, otimizar o uso de energia e reduzir significativamente as perdas operacionais.

A problemática central deste estudo está em compreender de que forma a implementação da IoT pode contribuir efetivamente para o monitoramento e redução das emissões de gases de efeito estufa no setor metal-mecânico. Partindo desse questionamento, busca-se investigar a relação entre automação, sustentabilidade e eficiência energética, identificando práticas tecnológicas que tornem os processos produtivos mais limpos e sustentáveis.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é analisar como a Internet das Coisas (IoT) pode ser aplicada ao setor metal-mecânico para monitorar e reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), promovendo práticas industriais mais sustentáveis. Para atingir essa finalidade, busca-se analisar as principais fontes de emissões de GEE no setor, classificando-as conforme os escopos do GHG Protocol (*Greenhouse Gas Protocol*) (WRI, 2015); compreender os requisitos regulatórios internacionais, como a ISO 14064 (ISO, 2018) e o Acordo de Paris (ONU, 2015), aplicáveis à gestão das emissões industriais; identificar soluções e sensores IoT disponíveis para o monitoramento de processos emissores de GEE; analisar a aplicação da IoT para o monitoramento de emissões de GEE em tempo real nas indústrias metal-mecânicas, bem como os benefícios ambientais e operacionais resultantes da adoção dessa tecnologia, destacando como a IoT pode contribuir para a redução efetiva das emissões e para o fortalecimento da sustentabilidade industrial.

A relevância deste estudo reside na contribuição para o debate sobre sustentabilidade industrial, ao evidenciar a importância da digitalização e da automação inteligente no combate às mudanças climáticas. Ao propor um olhar integrado entre tecnologia e meio ambiente, o trabalho reforça a necessidade de inovação como caminho para um futuro de baixo carbono, em que o setor metal-mecânico possa conciliar crescimento econômico e responsabilidade ambiental.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os GEE são substâncias atmosféricas que retêm calor na troposfera, intensificando o efeito estufa e contribuindo para o aquecimento global. Dentre os principais gases, destacam-se o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e os gases industriais como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆). Suas fontes variam desde a queima de combustíveis fósseis e atividades agropecuárias até processos

industriais e uso de refrigerantes. O aumento de suas concentrações intensifica a ocorrência de fenômenos climáticos extremos, como secas, enchentes e derretimento das calotas polares (IPCC, 2021; BRASIL, 2020).

Para mensurar e classificar as emissões de GEE, o *GHG Protocol* — principal ferramenta internacional de contabilização de GEE — estabelece três escopos: o Escopo 1 refere-se às emissões diretas, provenientes de fontes que pertencem ou são controladas por uma empresa, como a queima de combustíveis em caldeiras e geradores, o uso de veículos próprios e a liberação de gases por sistemas de ar-condicionado (WRI, 2015); o Escopo 2 abrange as emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica adquirida de concessionárias, como a eletricidade comprada e a energia térmica utilizada em processos industriais (WRI, 2015); e o Escopo 3 considera outras emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor, mas que não estão sob controle direto da organização, como o transporte de insumos e produtos por empresas terceirizadas, viagens a trabalho de funcionários, destinação de resíduos e emissões provenientes de fornecedores (WBCSD, 2011).

O *Acordo de Paris*, firmado em 2015, é um tratado internacional que busca limitar o aquecimento global a níveis inferiores a 2°C, preferencialmente 1,5°C, em relação ao período pré-industrial. O pacto estabelece que cada país defina suas metas nacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), revisando-as a cada cinco anos e garantindo apoio financeiro e técnico aos países em desenvolvimento. Além disso, o acordo exige transparência no monitoramento das metas e incentiva políticas de adaptação às mudanças climáticas (ONU, 2015). Nunes (2021) ressalta que, no contexto brasileiro, a adesão ao acordo impulsionou o setor industrial a adotar estratégias de inovação tecnológica alinhadas à descarbonização. Complementarmente, a norma *ISO 14064* (ISO, 2018) define padrões técnicos para quantificação e relato das emissões corporativas, assegurando consistência e credibilidade.

O setor *metal-mecânico*, responsável pela transformação e processamento de metais em segmentos como siderurgia, metalurgia, fundição e usinagem, é intensivo em energia e um dos principais emissores de GEE. As emissões decorrem da queima de combustíveis fósseis, do elevado consumo elétrico e de reações químicas liberadoras de CO₂ e N₂O. Também são relevantes as emissões fugitivas de gases industriais de alto potencial de aquecimento, como HFCs e SF₆ (CNI, 2019; IPCC, 2021).

As ações de mitigação nesse setor envolvem medidas de eficiência energética, substituição de combustíveis fósseis por fontes limpas, controle de emissões fugitivas e monitoramento contínuo do desempenho ambiental. A criação de inventários corporativos e a adoção de tecnologias digitais tornam-se indispensáveis para atender a normas como a *ISO 14064* (Inventário de GEE) e os compromissos do Acordo de Paris (WRI, 2015).

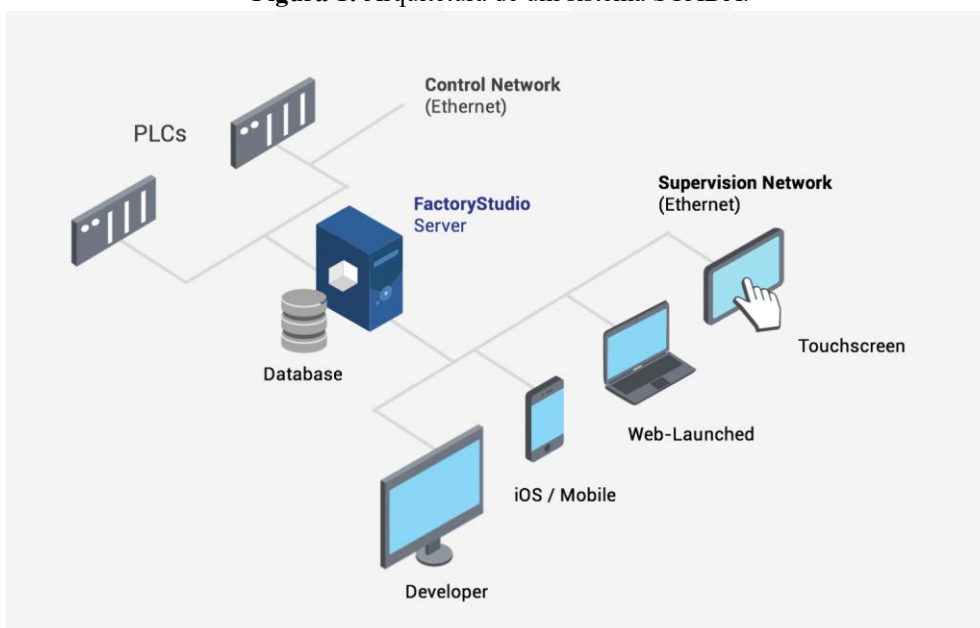
Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) surge como uma ferramenta que pode contribuir na gestão ambiental e na transição para uma indústria de baixo carbono. Santos et al. (2022) explicam que a IoT possibilita a interconexão entre máquinas, sensores e sistemas de controle que coletam e analisam dados em tempo real, otimizando processos e reduzindo o desperdício de energia. Essa digitalização

permite, segundo a IBM (2025), identificar gargalos produtivos e prever falhas operacionais antes que causem emissões desnecessárias, reduzindo significativamente o impacto ambiental.

Entre as tecnologias mais empregadas, destacam-se os sensores de umidade e temperatura (MAKERHERO, 2025), os controladores programáveis PLC (OPTO 22, 2025), os dispositivos de processamento como o microcontrolador ESP32 (USINAINFO, 2025) e os microcomputadores Raspberry Pi (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2025), os quais podem ser utilizados para coleta e processamento de dados ambientais. Essas ferramentas permitem uma integração direta com plataformas de big data e inteligência artificial, otimizando o monitoramento energético e as emissões de GEE, conforme descrito pela Altus (2024) e pelo relatório técnico da IBM (2025).

Além disso, no setor metal-mecânico, a IoT pode ser integrada a sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (TATSOFT, 2025) e PLC (*Programmable Logic Controller*) (OPTO, 2022), conforme ilustrado na Figura 1, permitindo o monitoramento e controle de processos industriais à distância e em tempo real.

Figura 1: Arquitetura de um sistema SCADA.



Fonte: TATSOFT (2025).

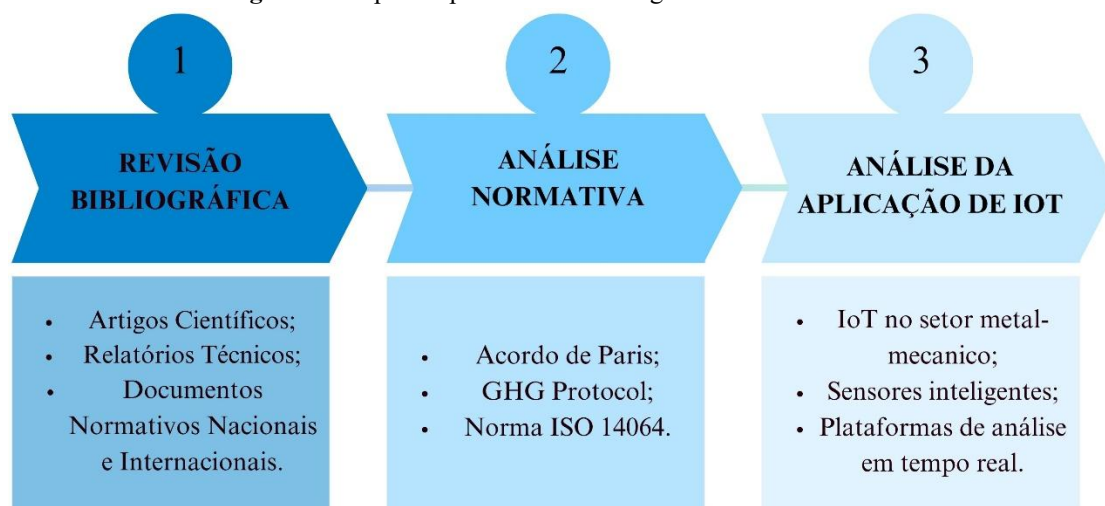
A integração da IoT com esses sistemas, segundo Gonçalves et al. (2022), cria um ecossistema digital que viabiliza a redução contínua de emissões e o acompanhamento do desempenho ambiental em tempo real.

Assim, a integração da IoT em processos industriais permite o uso de sensores inteligentes, automação e análise em tempo real de dados ambientais, otimizando o consumo energético, detectando vazamentos e prevenindo falhas, alinhando o setor metal-mecânico aos princípios da sustentabilidade e à agenda climática global (Santos et al., 2022; Altus, 2024).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o estudo busca compreender como a Internet das Coisas (IoT) pode contribuir para o monitoramento e a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no setor metal-mecânico foi estruturada em três etapas principais: revisão bibliográfica, análise normativa e análise de estudos de aplicação de IoT na indústria. A Figura 2 sintetiza as etapas do processo metodológico adotado no estudo, conforme apresentado a seguir.

Figura 2: Etapas do processo metodológico adotado no estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Conforme apresentado na Figura 2, na primeira etapa da metodologia, realizou-se uma revisão bibliográfica com base em artigos científicos, relatórios técnicos e documentos normativos nacionais e internacionais. Essa revisão buscou compreender o panorama atual do uso da IoT em contextos industriais, com foco em eficiência energética e sustentabilidade. O levantamento teórico permitiu identificar as principais tecnologias aplicadas, suas limitações e o potencial de integração com práticas de mitigação de GEE.

A segunda etapa envolveu uma análise normativa das principais diretrizes e regulamentações voltadas ao controle de emissões. Foram estudados o Acordo de Paris (ONU, 2015), o GHG Protocol (WRI, 2015) e a norma ISO 14064 (ISO, 2018), que tratam de inventários e certificações ambientais. Essa análise teve como objetivo compreender como as exigências legais e técnicas se aplicam ao setor metal-mecânico e de que maneira a IoT pode contribuir na adequação e conformidade ambiental.

Na terceira etapa foi desenvolvida uma análise de estudos relacionados à aplicação de IoT no setor metal-mecânico. Essa análise explorou o uso de sensores inteligentes, sistemas computacionais e plataformas de análise em tempo real para o monitoramento dos três escopos do GHG Protocol — emissões diretas (Escopo 1), emissões indiretas de consumo de energia (Escopo 2) e emissões indiretas associadas à cadeia de suprimentos (Escopo 3), buscando demonstrar como o monitoramento de dados em tempo real pode auxiliar na elaboração do inventário de emissões e otimizar o processo produtivo.

Essa abordagem metodológica permite uma compreensão ampla do papel da IoT no monitoramento e redução das emissões de GEE, permitindo uma análise sobre os benefícios e perspectivas de sua aplicação no setor metal-mecânico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O setor metal-mecânico é altamente dependente do consumo de eletricidade para manter suas operações produtivas em pleno funcionamento, sendo que a maior parte dessa energia é fornecida por concessionárias externas. Tal recurso é essencial para setores críticos como soldagem e corte a plasma, que demandam alta potência elétrica para operações precisas e contínuas; motores elétricos de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado), responsáveis por grande parte da automação nas linhas de produção; e sistemas de resfriamento e ventilação industrial, fundamentais para o controle térmico e segurança no ambiente fabril (Altus, 2024).

Com a aplicação da Internet das Coisas (IoT), novas possibilidades surgem para monitorar e otimizar o consumo energético nas fábricas. No contexto da energia, as tecnologias IoT permitem identificar, em tempo real, picos de consumo e propor sugestões inteligentes para redistribuição da carga elétrica entre setores, evitando sobrecargas nas máquinas e penalidades tarifárias (IBM, 2025). Também possibilitam a ativação automática de modos de economia de energia, especialmente em horários de baixa demanda ou turnos reduzidos, ajustando o funcionamento de máquinas e iluminação de forma inteligente conforme a necessidade ou número de funcionários presentes. A implementação de sistemas de controle remoto e automação permite, ainda, o desligamento programado de equipamentos em horários não operacionais, favorecendo a manutenção preventiva, a economia energética e o prolongamento da vida útil dos equipamentos (Altus, 2024).

Um exemplo prático dessa aplicação pode ser observado em uma fábrica de peças automotivas, onde sensores IoT instalados em prensas hidráulicas ajustam automaticamente a potência aplicada conforme o tipo de peça produzida e a demanda do momento. Dessa forma, evita-se o funcionamento desnecessário em potência máxima, reduzindo o consumo energético sem comprometer a produtividade, o que contribui significativamente para a redução de custos operacionais e para o cumprimento de metas de sustentabilidade corporativa (IBM, 2025).

Além das emissões diretas originadas nos processos produtivos, a indústria metal-mecânica também é responsável por emissões fugitivas – aquelas que ocorrem de forma difusa, acidental ou não intencional – e por emissões indiretas provenientes de processos auxiliares. Entre os principais gases envolvidos estão os refrigerantes, como os hidrofluorcarbonetos (HFCs), usados em sistemas de resfriamento industrial, e o hexafluoreto de enxofre (SF₆), um dos gases de efeito estufa mais potentes, com uso comum em processos de soldagem, fundição e equipamentos de alta tensão (IPCC, 2021).

Nesse contexto, a IoT se torna uma importante aliada estratégica ao possibilitar a detecção precoce de vazamentos através de sensores capazes de identificar concentrações anormais de gases no ambiente. Esses sistemas permitem ações automatizadas em situações críticas, como a interrupção imediata de processos em caso de vazamentos perigosos, evitando riscos à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente, bem como a geração de alertas em tempo real para ações corretivas e manutenção preditiva de sistemas e equipamentos que operam com gases poluentes (Altus, 2024). Um exemplo

concreto surge em linhas de soldagem, onde sensores IoT monitoram continuamente os níveis de SF₆ e, ao identificar uma liberação acima do limite seguro, acionam mecanismos de filtragem ou enviam alertas para equipes de manutenção, permitindo resposta rápida e eficaz.

Os dados coletados por sensores IoT constituem uma importante fonte de informações que, tratados com técnicas de Inteligência Artificial (IA) e Machine Learning, podem gerar dados relevantes para a gestão ambiental. Essa abordagem permite desenvolver modelos preditivos capazes de estimar o volume de emissões futuras com base em padrões históricos e variáveis operacionais, simular cenários de produção com foco em otimização de processos e redução da pegada de carbono, além de gerar relatórios automáticos de emissões para auditorias ambientais, cumprimento de regulamentações e participação em programas de compensação de carbono (IBM, 2025; WRI, 2015). Tais análises contribuem para o planejamento estratégico empresarial, facilitando decisões sobre onde e como reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE).

De acordo com o BNDES (2021), a digitalização por meio de redes inteligentes permite reduzir perdas energéticas e aumentar a eficiência operacional em até 20%. No setor metal-mecânico, Gonçalves et al. (2022) evidenciam que o uso de IoT associada a big data e machine learning possibilita prever padrões de consumo e otimizar a utilização de recursos, tornando o processo produtivo mais limpo e competitivo.

A análise de estudos realizados em empresas do setor metal-mecânico, como o apresentado por Aguiar et al. (2016), indica reduções expressivas de emissões após a implementação de tecnologias de automação e monitoramento. O estudo de caso realizado em uma indústria do setor metal mecânico no Rio de Janeiro (Aguiar et al., 2016) mostrou que a adoção de sistemas inteligentes de controle resultou em uma compensação de carbono de aproximadamente 25%, demonstrando o potencial da tecnologia para o cumprimento de metas ambientais.

Relatórios da CNI (2019) e do BNDES (2021) também confirmam ganhos de eficiência energética após a digitalização de processos, destacando reduções médias de 15% no consumo de energia e 12% nas emissões de CO₂ em indústrias que adotaram soluções IoT. Esses resultados foram corroborados pela IBM (2025), que identificou aumento da produtividade e redução de falhas operacionais com a automação baseada em sensores e inteligência artificial.

Apesar dos resultados positivos, a Silva et al. (2022) alerta que os custos iniciais de instalação e a carência de profissionais qualificados ainda são barreiras significativas à expansão da IoT no Brasil. Entretanto, segundo Gonçalves et al. (2022), o retorno econômico e ambiental a médio prazo compensa os investimentos, especialmente quando há integração com políticas de eficiência energética.

Outro aspecto relevante é a mudança de percepção dos gestores industriais, que passaram a compreender a sustentabilidade não apenas como obrigação legal, mas como parte estratégica do negócio. Esse reposicionamento empresarial foi citado por Nunes (2021) como um marco para a inserção do Brasil na economia verde e digital.

No plano social, a digitalização sustentável gera benefícios adicionais, como ambientes de trabalho mais seguros e processos mais rastreáveis. Essa convergência entre tecnologia, economia e meio ambiente caracteriza o que Gonçalves et al. (2022) denominam de “sustentabilidade inteligente”.

Portanto, a IoT não se limita a um recurso tecnológico, seu potencial para promover uma economia de baixo carbono faz dela um instrumento importante para a transição ecológica do setor metal-mecânico e o alcance de metas globais de sustentabilidade definidas pela ONU (UN, 2015).

Entretanto, há lacunas relevantes na literatura, estudos como os de Silva et al. (2022) e Ishola (2024) indicam que pequenas e médias indústrias ainda enfrentam desafios financeiros e estruturais para incorporar tecnologias IoT. Além disso, a ausência de padronização de indicadores ambientais e de capacitação técnica limita a eficácia dos sistemas implantados.

Esses achados reforçam que, embora a IoT tenha demonstrado impactos positivos no monitoramento e redução de emissões e na eficiência energética, a consolidação de sua aplicação exige políticas públicas de incentivo, alinhamento a metas internacionais e integração entre academia, governo e setor produtivo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente pressão sobre as práticas industriais por soluções sustentáveis e o combate às mudanças climáticas têm impulsionado a adoção de tecnologias inovadoras, como a Internet das Coisas (IoT), especialmente em setores de alta intensidade energética, como o metal-mecânico. Ao longo deste estudo, constatou-se que a IoT se apresenta como uma ferramenta importante para o monitoramento e a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Aguilar et al., 2016; IPCC, 2021), atuando de forma transversal em diferentes etapas do processo produtivo e contribuindo diretamente para a eficiência energética e a descarbonização industrial.

A utilização de sensores inteligentes, integrados a sistemas de controle e análise em tempo real, permite não apenas a detecção e correção imediata de anomalias, como também a geração de dados estratégicos para a tomada de decisões mais sustentáveis e eficientes. Com isso, as empresas conseguem mapear com maior precisão suas fontes de emissão, além de atender às exigências regulatórias nacionais e internacionais, como o GHG Protocol, ISO 14064 e o Acordo de Paris, além de promover uma redução efetiva da pegada de carbono.

Além de mitigar impactos ambientais, a IoT proporciona ganhos operacionais expressivos, como a manutenção preditiva de equipamentos, a otimização do consumo energético e a redução de desperdícios, promovendo aumento da produtividade e da competitividade organizacional. Ainda assim, é importante destacar os constantes desafios associados à implementação dessas tecnologias, como os altos custos iniciais de implementação, a necessidade de capacitação técnica e a adaptação de sistemas legados.

Apesar disso, as perspectivas para o setor metal-mecânico são promissoras. Com o avanço da miniaturização de sensores, a ampliação da conectividade e a integração com soluções de inteligência artificial, espera-se que a IoT se torne cada vez mais acessível, e um dos eixos centrais na transformação digital sustentável. Assim, conclui-se que a IoT não é apenas uma alternativa viável,

mas uma ferramenta estratégica para que o setor metal-mecânico evolua rumo a uma produção mais limpa, eficiente e comprometida com os metas globais de desenvolvimento sustentável.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. V. et al. Neutralização compensatória de carbono – estudo de caso: indústria do setor metal-mecânico, Rio de Janeiro (RJ). *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 1, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/4TtN59RzDRtYGWSdvQbJbqQ/?lang=pt>>. Acesso em: 12 out. 2025.

ALTUS. Entenda o impacto da IoT na indústria. 2024. Disponível em: <<https://www.altus.com.br/post/560/iot-na-industria>>. Acesso em: 12 out. 2025.

ALTUS. Soluções IoT para Indústria Metal-Mecânica. São Paulo, 2024.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). *Rede de Iluminação Inteligente: relatório técnico*. Rio de Janeiro: BNDES, 2021. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/6e3c4f84-3456-4e7c-81b3-46d3e2d1bb96/relatorio-tecnico-BNDES-rede-de-iluminacao-inteligente.pdf>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima: atualizações e compromissos no âmbito do Acordo de Paris*. Brasília, DF: MMA, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/clima>>. Acesso em: 18 out. 2025.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. *Eficiência energética e emissões no setor metal-mecânico: diagnóstico e perspectivas*. Brasília, DF: CNI, 2019. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/>>. Acesso em: 18 out. 2025.

GONÇALVES, V. A. et al. Tecnologias sustentáveis no setor produtivo brasileiro: contribuições da Indústria 4.0 para a redução de impactos ambientais. *Universidade Presbiteriana Mackenzie*, 2022. Disponível em: <<https://adelfa-api.mackenzie.br/server/api/core/bitstreams/108a329a-45c2-44f2-a012-62e7a19e565f/content>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

IBM. O que é Internet das Coisas (IoT)?. 2025. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/internet-of-things>>. Acesso em: 12 out. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ISHOLA, Akinwale. IoT applications in sustainability and sustainable community development. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, v. 24, n. 1, p. 2634–2640, 2024. Department of Sustainability, Eastern Illinois University, USA. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/385425881_IoT_applications_in_sustainability_and_sustainable_community_development>. Acesso em: 22 out. 2025.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14064 – Greenhouse gases — Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals*. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.

MAKERHERO. Sensor de Umidade e Temperatura DHT11. 2025. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11/>>. Acesso em: 1 abr. 2025.

NUNES, M. S. *O Brasil no Acordo de Paris sobre mudanças climáticas: energia, emissões e desenvolvimento sustentável*. São Paulo: Letramento, 2021. Disponível em: <https://www.google.com.br/books/edition/_/c4saEAAAQBAJ>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Acordo de Paris*. Nova Iorque: ONU, 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>>. Acesso em: 18 out. 2025.

OPTO 22. What is a PLC?. 2025. Disponível em: <<https://www.opto22.com/support/resources-tools/what-is-a-plc>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspberry Pi 4 Model B – 8GB. 2025. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SANTOS, Luís; ANTUNES, Emanuel; CALDEIRA, João M. L. P.; SOARES, Vasco N. G. J. A Internet das Coisas: Revisão da Literatura e Questões em Aberto. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação*, v. 20, n. 1, p. 1–12, 2022. Sociedade Brasileira de Computação (SBC OpenLib). Disponível em: <<https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/reic/article/view/2056/1941>>. Acesso em: 18 out. 2025.

SANTOS, B. P. et al. A Internet das Coisas: revisão da literatura e questões de pesquisa. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação*, v. 20, n. 1, 2022. Disponível em: <<https://journals-sol.sbc.org.br/index.php/reic/article/download/2056/1941>>. Acesso em: 12 abr. 2025.

SILVA, M. L. R. et al. Gestão de recursos hídricos: utilização de internet das coisas. In: *Anais do IV SUSTENTARE e VII WIPIS*, 2022. [S. l.: s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.sustentarewipis.com.br/wp-content/uploads/artigos/2021/425164.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2025.

TATSOFT LLC. Definitions | What is SCADA?. 2025. Disponível em: <<https://tatsoft.com/definitions-what-is-scada/>>. Acesso em: 1 abr. 2025.

UNITED NATIONS (UN). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

USINAINFO. ESP32 WROOM 32U DevKitC V4 com WiFi e Bluetooth. 2025. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/esp32/esp32-wroom-32u-devkitc-v4-com-wifi-e-bluetooth-7077.html>>. Acesso em: 2 abr. 2025.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. Geneva: WBCSD; World Resources Institute, 2011. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/standards/scope-3-standard>>. Acesso em: 18 out. 2025.

WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE. *GHG Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. Washington, DC: WRI, 2015.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*. 2004. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2025.