ECONOMIA CIRCULAR E INDÚSTRIA 5.0 NO SETOR METALMECÂNICO: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE GRANDE PORTE

CIRCULAR ECONOMY AND INDUSTRY 5.0 IN THE METALWORKING SECTOR: A CASE STUDY IN A LARGE COMPANY

GUSTAVO DE OLIVEIRA HANAUER
UNIVERSIDADE FEEVALE

DUSAN SCHREIBER
UNIVERSIDADE FEEVALE

LUCIANE PEREIRA VIANA
UNIVERSIDADE FEEVALE

Comunicação:
O XIV SINGEP foi realizado em conjunto com a 14th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) e com a SPARK (Society for Promoting Academic Research and Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

Agradecimento à orgão de fomento:
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

ECONOMIA CIRCULAR E INDÚSTRIA 5.0 NO SETOR METALMECÂNICO: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE GRANDE PORTE

Objetivo do estudo
O objetivo do estudo foi realizar o diagnóstico sobre o alinhamento das práticas de EC com a I5.0 em uma empresa de grande porte do setor metalmecânico no Brasil., identificando estratégias de circularidade, digitalização e sustentabilidade presentes no contexto operacional da organização.

Relevância/originalidade
O estudo contribui para as discussões sobre a convergência entre economia circular e indústria 5.0, temática ainda recente no contexto industrial brasileiro, especialmente em setores produtivos intensivos em recursos, tecnologia e inovação operacional.

Metodologia/abordagem
A pesquisa adotou abordagem qualitativa, descritiva e exploratória, utilizando estudo de caso único, com coleta de dados por meio de entrevista em profundidade, análise documental e observação não participante. Os dados foram submetidos à técnica de análise de conteúdo.

Principais resultados
Os resultados evidenciaram elevado nível de maturidade circular, associado ao uso de IoT, blockchain, robótica e manufatura aditiva, demonstrando integração entre sustentabilidade, digitalização, rastreabilidade, eficiência operacional e valorização humana no ambiente industrial analisado.

Contribuições teóricas/metodológicas
O estudo amplia as discussões teóricas sobre a compatibilidade entre economia circular e indústria 5.0.

Contribuições sociais/para a gestão
Os resultados oferecem subsídios para gestores industriais interessados em integrar sustentabilidade e transformação digital, contribuindo para o desenvolvimento de operações mais inteligentes, resilientes e alinhadas às demandas ambientais e sociais contemporâneas.

Palavras-chave: Economia Circular, Gestão Inovadora, Sustentabilidade, Tecnologias da Indústria 5.0, Setor industrial

CIRCULAR ECONOMY AND INDUSTRY 5.0 IN THE METALWORKING SECTOR: A CASE STUDY IN A LARGE COMPANY

Study purpose
The objective of this study was to diagnose the alignment of circularity practices with Industry 5.0 in a large company in the metalworking sector in Brazil, identifying circularity, digitalization, and sustainability strategies present in the organization's operational context.

Relevance / originality
The study contributes to discussions on the convergence between circular economy and Industry 5.0, a still emerging topic in the Brazilian industrial context, especially in productive sectors characterized by intensive use of resources, technology, and operational innovation.

Methodology / approach
The research adopted a qualitative, descriptive, and exploratory approach, using a single case study, with data collection through in-depth interviews, document analysis, and non-participant observation. The data were subjected to content analysis.

Main results
The results revealed a high level of circular maturity associated with the use of IoT, blockchain, robotics, and additive manufacturing, demonstrating integration between sustainability, digitalization, traceability, operational efficiency, and human-centered practices in the industrial environment analyzed.

Theoretical / methodological contributions
The study expands theoretical discussions on the compatibility between circular economy and Industry 5.0.

Social / management contributions
The findings provide insights for industrial managers interested in integrating sustainability and digital transformation, contributing to the development of smarter, more resilient operations aligned with contemporary environmental and social demands.

Keywords: Circular Economy, Innovative Management, Sustainability, Industry 5.0 Technologies, Industrial Sector

ECONOMIA CIRCULAR E INDÚSTRIA 5.0 NO SETOR METALMECÂNICO: ESTUDO DE CASO EM EMPRESA DE GRANDE PORTE

1 Introdução

A crescente pressão por modelos produtivos mais sustentáveis tem intensificado os debates sobre a necessidade de integrar inovação tecnológica, desempenho ambiental e valorização humana no contexto industrial. Nesse cenário, a economia circular (EC) e a indústria 5.0 (I5.0) emergem como abordagens complementares capazes de contribuir para a transformação dos sistemas produtivos tradicionais, especialmente em setores industriais intensivos em recursos naturais e tecnológicos (Ahmad et al., 2023; Leon et al., 2024; Reike et al., 2023).

De um lado, a economia circular propõe uma ruptura com a lógica linear de produção baseada em extração, consumo e descarte, incentivando práticas voltadas ao reaproveitamento de materiais, extensão do ciclo de vida dos produtos, redução de resíduos e regeneração de recursos (Reike et al., 2023; Uwuigbe et al., 2025). Além dos benefícios ambientais, o modelo também vem sendo associado à criação de valor sustentável, eficiência operacional e fortalecimento da competitividade organizacional (Chaudhary et al., 2025; Castro-Lopez et al., 2025). Entretanto, sua implementação depende não apenas de mudanças técnicas, mas também de transformações culturais, organizacionais e gerenciais (Pfeffer et al., 2025).

Paralelamente, a indústria 5.0 amplia as discussões iniciadas pela indústria 4.0 ao defender uma integração mais equilibrada entre seres humanos e tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos e robótica colaborativa (Maddikunta et al., 2022; Mukherjee et al., 2023). Diferentemente de modelos focados exclusivamente na automação, a I5.0 enfatiza a centralidade humana, a resiliência organizacional e a sustentabilidade como pilares estratégicos dos ambientes produtivos (Fukuda, 2020; Leon et al., 2024; Santhi & Muthuswamy, 2023).

Nesse contexto, observa-se que a convergência entre EC e I5.0 possui potencial para fortalecer modelos industriais mais inteligentes, regenerativos e sustentáveis. As tecnologias digitais podem ampliar a rastreabilidade, otimizar o uso de recursos e reduzir desperdícios, enquanto os princípios da circularidade contribuem para orientar a inovação tecnológica em direção a práticas ambientalmente responsáveis e socialmente mais equilibradas (Ahmad et al., 2023; Ivanov, 2022; Reike et al., 2023). Dessa forma, a integração entre essas abordagens vem sendo reconhecida como uma oportunidade estratégica para o avanço da sustentabilidade industrial.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo realizar o diagnóstico sobre o alinhamento das práticas de EC com a I5.0 em uma empresa de grande porte do setor metalmecânico no Brasil. Para isso, foram analisadas as práticas de circularidade e as tecnologias digitais implementadas em uma empresa localizada na região do Vale do Rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul, identificada neste estudo pelo codinome Empresa XYZ.

A escolha deste assunto justifica-se, portanto, para o meio acadêmico e científico, pela contribuição ao tema, cada vez mais discutido no mundo inteiro; para empresas de grande, médio e pequeno porte da região, que através da análise poderão replicar este estudo na sua operação e verificar a aplicabilidade do processo na realidade em que estão inseridas e; pela necessidade de repensar os modelos produtivos frente às crescentes necessidades ambientais, sociais e tecnológicas. O estudo contribui, portanto, com uma reflexão crítica e estruturada sobre como a incorporação simultânea desses conceitos pode potencializar o desempenho sustentável das organizações, especialmente em setores industriais intensivos em recursos.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Economia Circular

A economia circular (EC) consolidou-se como uma alternativa ao modelo linear tradicional de produção e consumo, propondo estratégias voltadas à redução de resíduos, reaproveitamento de materiais e regeneração de recursos ao longo dos ciclos produtivos (Reike et al., 2023; Uwuigbe et al., 2025). Diferentemente da lógica baseada em extrair, produzir e descartar, a EC busca prolongar a vida útil de produtos e componentes, promovendo maior eficiência no uso de recursos naturais e redução dos impactos ambientais (Bachmann et al., 2023; Mohan & Katakojwala, 2021).

Nesse contexto, a circularidade depende não apenas de mudanças técnicas, mas também de transformações organizacionais, gerenciais e culturais. A adoção de práticas como logística reversa, reutilização, reciclagem, remanufatura e *redesign* de produtos exige integração entre os diferentes atores da cadeia produtiva, fortalecendo modelos colaborativos e estratégias sustentáveis de gestão de operações (Andika et al., 2025; Chaudhary et al., 2025). Além disso, tecnologias digitais e práticas inovadoras vêm sendo reconhecidas como mecanismos de apoio à implementação da EC, especialmente em ambientes industriais complexos (Ahmad et al., 2023; Arekrans et al., 2023).

Destaca-se também que a transição para modelos circulares pode contribuir para o fortalecimento da competitividade organizacional, redução de custos operacionais e aumento da resiliência frente à escassez de recursos naturais (Castro-Lopez et al., 2025; Toboso-Chavero et al., 2025). Entretanto, ainda existem desafios relacionados aos altos custos de implementação, às limitações regulatórias e à necessidade de integração entre diferentes políticas ambientais e industriais (Alaranta & Turunen, 2021; Pfeffer et al., 2025).

Outro aspecto refere-se à dimensão humana da circularidade. Destaca-se, por exemplo, a importância da gestão circular de recursos humanos, do desenvolvimento de competências sustentáveis e do engajamento dos colaboradores na consolidação da EC dentro das organizações (Dragan et al., 2024; Pronti et al., 2024). Dessa forma, a economia circular não deve ser compreendida apenas como um conjunto de práticas ambientais, mas como um modelo estratégico orientado à transformação sistêmica dos processos produtivos, envolvendo dimensões tecnológicas, organizacionais e sociais (Castro-Lopez et al., 2025; Kaewunruen et al., 2025;).

2.2 Indústria 5.0

A Indústria 5.0 (I5.0) emerge como uma evolução dos modelos produtivos digitalizados introduzidos pela Indústria 4.0, propondo uma integração mais equilibrada entre tecnologia, sustentabilidade e centralidade humana (Fukuda, 2020; Karmaker et al., 2023; Khan et al., 2022). Diferentemente da lógica predominantemente orientada à automação intensiva, a I5.0 enfatiza a colaboração entre seres humanos e sistemas inteligentes, buscando ambientes produtivos mais resilientes, sustentáveis e socialmente responsáveis (Leon et al., 2024; Santhi & Muthuswamy, 2023).

Esse modelo é sustentado pelo uso de tecnologias avançadas, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, *blockchain*, sistemas ciberfísicos, análise de *big data* e robótica colaborativa, aplicadas de maneira integrada aos processos organizacionais (Maddikunta et al., 2022; Mukherjee et al., 2023). Além da otimização operacional, essas tecnologias permitem

ampliar a rastreabilidade, monitorar fluxos produtivos em tempo real e fortalecer a tomada de decisão baseada em dados (Ivanov, 2022; Karmaker et al., 2023).

Além disso, destaca-se que a I5.0 possui relação direta com sustentabilidade e resiliência organizacional, especialmente diante das transformações econômicas e sociais intensificadas nos últimos anos (Massari & Giannoccaro, 2021). Nesse sentido, a integração entre inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental pode contribuir para o desenvolvimento de cadeias produtivas mais adaptáveis, transparentes e eficientes (Battini et al., 2022; Burgos & Ivanov, 2021).

Outro aspecto central da I5.0 refere-se à valorização do capital humano. Diferentemente de modelos produtivos centrados apenas na eficiência técnica, a Indústria 5.0 reconhece a criatividade, o pensamento crítico e a capacidade adaptativa dos trabalhadores como elementos estratégicos para inovação e competitividade (Modgil et al., 2023; Santhi & Muthuswamy, 2023). Dessa forma, práticas relacionadas ao compartilhamento do conhecimento, desenvolvimento de competências e bem-estar organizacional tornam-se fundamentais para a consolidação desse modelo industrial (Leon et al., 2024).

Apesar do potencial estratégico da I5.0, sua implementação ainda enfrenta desafios, sobretudo em economias emergentes, devido a limitações estruturais, resistência organizacional e necessidade de investimentos tecnológicos e qualificação profissional (Castro-Lopez et al., 2025; Karmaker et al., 2023). Ainda assim, observa-se que a convergência entre Indústria 5.0 e economia circular fortalece a construção de modelos produtivos mais inteligentes, regenerativos e sustentáveis, alinhando inovação tecnológica, eficiência operacional e valorização humana (Ahmad et al., 2023; Leon et al., 2024; Reike et al., 2023).

3 Metodologia

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, contemplando a caracterização do estudo, a contextualização do setor analisado, as técnicas de coleta de dados e os procedimentos utilizados para análise das informações obtidas.

3.1 Caracterização da Pesquisa

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso único, conduzido a partir de uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva (Demo, 2022; Yin, 2018). O estudo foi desenvolvido em uma empresa de grande porte do setor metalmecânico, localizada na região do Vale do Rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul, identificada neste trabalho pelo codinome Empresa XYZ, visando preservar sua identidade institucional.

A escolha da organização ocorreu em função da presença de práticas relacionadas à economia circular e da adoção de tecnologias alinhadas à indústria 5.0 no contexto operacional da empresa. Além disso, a organização possui atuação nacional e internacional no segmento industrial metalmecânico, apresentando estrutura consolidada de gestão ambiental, sustentabilidade corporativa e inovação tecnológica.

A estratégia de estudo de caso mostrou-se adequada por possibilitar uma investigação aprofundada sobre fenômenos contemporâneos inseridos em contextos organizacionais reais, permitindo compreender as relações entre práticas de circularidade, tecnologias digitais e gestão sustentável dentro do ambiente industrial (Yin, 2018).

3.2 O Setor Metalmecânico

O setor metalmecânico apresenta relevância econômica e estratégica no contexto industrial brasileiro e global, especialmente por sua relação com processos produtivos intensivos em tecnologia, transformação de matérias-primas e desenvolvimento de soluções industriais (CNI, 2025; SEBRAE, 2026; Spellmeier et al., 2025; Zhang et al., 2026). Além disso, trata-se de um segmento diretamente impactado pelas discussões relacionadas à inovação, eficiência operacional e sustentabilidade, principalmente diante da crescente necessidade de modernização produtiva e redução dos impactos ambientais associados às operações industriais (Grafstrom et al., 2025).

Nesse contexto, a integração entre práticas de economia circular e tecnologias da indústria 5.0 torna-se relevante no setor metalmecânico, uma vez que a adoção de sistemas inteligentes, automação, monitoramento digital e reaproveitamento de recursos pode contribuir para o fortalecimento da competitividade, otimização de processos e desenvolvimento de modelos produtivos mais sustentáveis (Battini et al., 2022; Toboso-Chavero et al., 2025).

3.3 Técnicas de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de três técnicas complementares: (i) entrevista em profundidade; (ii) análise documental e; (iii) observação não participante (Gil, 2008; Malhotra, 2019). A utilização dessas diferentes fontes permitiu a triangulação das informações e ampliou a compreensão acerca das práticas de economia circular e das tecnologias da indústria 5.0 presentes na organização analisada.

A entrevista em profundidade foi realizada com o gestor ambiental da empresa, identificado neste estudo como E1. O entrevistado atua diretamente nas questões relacionadas à sustentabilidade, práticas ambientais e implementação de tecnologias no contexto organizacional. Em relação ao perfil do participante, trata-se de um profissional do sexo masculino, com idade entre 30 e 40 anos, formação em nível de pós-graduação e experiência de aproximadamente dois anos no cargo, características que demonstram proximidade com os processos analisados e capacidade de compreensão estratégica das operações.

O roteiro da entrevista foi elaborado a partir da revisão da literatura e submetido à validação prévia por dois especialistas doutores da área de administração e por um colaborador da própria organização, garantindo clareza, coerência e adequação dos questionamentos (Gil, 2008; Malhotra, 2019). A entrevista foi realizada em outubro de 2025 de forma *online*, utilizando a plataforma Teams, sendo posteriormente gravada e transcrita integralmente.

A análise documental foi conduzida a partir de relatórios de sustentabilidade, certificações ambientais, registros internos e documentos disponibilizados pela empresa, permitindo identificar práticas ambientais, tecnologias implementadas e estratégias relacionadas à circularidade e inovação. Paralelamente, a observação não participante foi realizada em outubro de 205, durante visitas ao complexo industrial, possibilitando compreender aspectos relacionados ao *layout* produtivo, funcionamento operacional, sistemas de monitoramento e práticas ambientais desenvolvidas na organização.

A Tabela 1 apresenta uma síntese das técnicas utilizadas na etapa de coleta de dados.

Tabela 1. Técnica de coleta de dados, objetivo, fonte dos empíricos e período de coleta

Técnica	Objetivo	Fonte	Período
Entrevista em profundidade	Compreender práticas ambientais e tecnologias implementadas	Gestor ambiental (E1)	Outubro de 2025
Análise documental	Identificar registros, indicadores e estratégias ambientais	Relatórios e documentos internos	Outubro de 2025

Técnica	Objetivo	Fonte	Período
Observação não participante	Verificar práticas operacionais e estrutura produtiva	Complexo industrial	Outubro de 2025

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3.4 Procedimentos de Análise e Triangulação dos Dados

Para análise dos dados, utilizou-se a técnica de análise de conteúdo proposta por Bardin (2020), organizada em três etapas principais: (i) pré-análise; (ii) categorização e organização das informações e; (iii) interpretação dos resultados.

Na etapa de pré-análise foram organizados os instrumentos de coleta, definidos os objetivos analíticos e estruturadas as categorias centrais da investigação. Posteriormente, realizou-se a sistematização das informações obtidas nas entrevistas, documentos e observações, buscando identificar padrões, relações e evidências empíricas relacionadas ao objetivo do estudo.

As categorias de análise foram definidas com base no referencial teórico e estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Categorias de análise e objetivos analíticos

Categoria de análise	Objetivo analítico
Práticas de Economia Circular	Identificar práticas de circularidade presentes na organização
Tecnologias da Indústria 5.0	Mapear tecnologias digitais aplicadas na operação
Integração entre EC e I5.0	Compreender as relações entre circularidade e tecnologias digitais

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4 Análise dos Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta a análise integrada dos dados obtidos por meio das entrevistas, análise documental e observação não participante, buscando compreender como práticas de economia circular e tecnologias da indústria 5.0 se articulam no contexto operacional da Empresa XYZ. A triangulação entre as diferentes fontes permitiu identificar evidências relacionadas à circularidade, digitalização, valorização humana e inovação sustentável no ambiente industrial analisado.

4.1 Práticas de Economia Circular Identificadas na Empresa XYZ

Os resultados demonstram que a economia circular está incorporada de maneira estrutural às operações da Empresa XYZ, abrangendo desde a gestão de resíduos até estratégias relacionadas à durabilidade dos produtos e reaproveitamento de recursos. Durante a entrevista, o gestor ambiental destacou que a organização possui preocupação com o prolongamento do ciclo de vida dos produtos, especialmente por meio de práticas de manutenção e assistência no pós-venda, alinhando-se aos princípios de extensão da vida útil e redução da obsolescência discutidos por Reike et al. (2023), Andika et al. (2025) e Uwuigbe et al. (2025).

Além disso, verificou-se a existência de práticas voltadas ao reaproveitamento de resíduos industriais, com aproximadamente 98% dos resíduos gerados sendo destinados à recuperação energética. A empresa também adota iniciativas relacionadas à reutilização de *pallets*, logística reversa e parcerias com cooperativas de reciclagem, evidenciando uma perspectiva de circularidade que ultrapassa os limites da operação fabril e incorpora dimensões sociais e ambientais da sustentabilidade (Chaudhary et a., 2025; Kaewunruen et al., 2025).

A análise documental reforçou essas evidências ao identificar práticas como o reuso de aproximadamente 50% da água utilizada na operação industrial e o desenvolvimento de projetos voltados ao aproveitamento energético de resíduos orgânicos por meio da produção de biometano. Essas iniciativas demonstram alinhamento com estratégias de eficiência no uso de recursos, redução de impactos ambientais e adoção de fontes renováveis, conforme discutido por Bachmann et al. (2023), Mohan e Katakojwala (2021) e Castro-Lopez et al. (2025).

A observação não participante também permitiu visualizar, na prática, a existência de estruturas voltadas à gestão circular dos recursos. Durante as visitas ao complexo industrial, observou-se o funcionamento integrado da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), áreas específicas para gerenciamento de resíduos e sistemas de monitoramento relacionados ao ciclo hídrico da empresa. Essas evidências confirmam a integração entre práticas ambientais e infraestrutura operacional no contexto organizacional analisado.

De maneira geral, os resultados indicam que a Empresa XYZ apresenta elevado nível de maturidade em relação às práticas de economia circular, incorporando princípios de reaproveitamento, regeneração de recursos e sustentabilidade como parte integrante de sua estratégia operacional e ambiental.

4.2 Tecnologias da Indústria 5.0 na Operação da Empresa XYZ

A análise dos dados evidenciou que a Empresa XYZ possui tecnologias associadas à indústria 5.0 incorporada em seus processos produtivos e operacionais. Entre as principais tecnologias identificadas destacam-se Internet das Coisas (IoT), *blockchain*, robótica avançada, sistemas automatizados e manufatura aditiva, aplicadas tanto para otimização produtiva quanto para monitoramento ambiental e segurança operacional.

Durante a entrevista, o gestor ambiental relatou a utilização de sistemas de IoT para monitoramento em tempo real do consumo de água e energia, permitindo maior controle sobre os recursos utilizados na operação industrial. Esse resultado reforça as discussões de Maddikunta et al. (2022), Mukherjee et al. (2023) e Karmaker et al. (2023) acerca da digitalização dos processos industriais e da integração entre sistemas inteligentes e sustentabilidade organizacional.

Além disso, foi identificada a presença de robótica avançada em áreas produtivas de maior risco operacional, especialmente em ambientes de alta temperatura, reduzindo a exposição dos trabalhadores a condições insalubres e fortalecendo o princípio de centralidade humana defendido pela indústria 5.0 (Fukuda, 2020; Khan et al, 2022; Santhi & Muthuswamy, 2023). A utilização de impressoras 3D e manufatura aditiva também foi mencionada como estratégia para redução de desperdícios e otimização produtiva.

No âmbito documental, observou-se a existência de investimentos relacionados à digitalização e integração operacional, incluindo a implantação de uma usina fotovoltaica e a unificação global do sistema SAP entre as empresas pertencentes ao grupo corporativo. Essa integração possibilita maior rastreabilidade de informações e alinhamento entre processos produtivos, ambientais e logísticos, aproximando-se do conceito de cadeias inteligentes e conectadas discutido por Battini et al. (2022), Ivanov (2022) e Burgos e Ivanov (2021).

As evidências observadas durante a visita técnica reforçaram a presença das tecnologias habilitadoras da indústria 5.0 no ambiente produtivo. Foram identificados painéis digitais de monitoramento, sensores integrados por IoT e sistemas automatizados para controle operacional e segurança. Destaca-se também a existência de pontos automatizados para retirada de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), nos quais os colaboradores realizam acesso mediante cartão e senha, permitindo rastreabilidade e controle do uso dos equipamentos.

Os resultados demonstram que a adoção tecnológica na Empresa XYZ não está restrita apenas à automação produtiva, mas associada à construção de um ambiente industrial mais seguro, conectado e orientado à sustentabilidade. Dessa forma, observa-se que as tecnologias da indústria 5.0 são utilizadas como mecanismos estratégicos de integração entre eficiência operacional, digitalização e valorização humana.

4.3 Integração entre Economia Circular e Indústria 5.0

Os resultados obtidos indicam que a integração entre economia circular e indústria 5.0 ocorre de forma sistêmica na Empresa XYZ, especialmente por meio da articulação entre tecnologias digitais, monitoramento operacional e práticas voltadas à sustentabilidade. Essa convergência foi identificada tanto nas respostas do entrevistado quanto na análise documental e na observação.

A Tabela 3 sintetiza as evidências empíricas identificadas nas três fontes de dados (entrevista, análise documental e observação não participante) apresentando uma visão comparativa das práticas e tecnologias observadas. Ela demonstra como cada categoria de análise (economia circular, indústria 5.0 e integração EC–I5.0) se manifesta nas diferentes dimensões empíricas e teóricas.

Tabela 3. Relação entre as categorias de análise e a fonte dos dados empíricos

Categoria de Análise	Entrevista	Análise Documental	Observação Não Participante	Fundamentação teórica
Práticas de Economia Circular	98% de resíduos reaproveitados; pós-venda e manutenção; parcerias com cooperativas.	Reuso de 50% da água; projeto de biometano; reaproveitamento energético.	Ciclo hídrico monitorado; central de resíduos e ETE em operação.	Reike et al. (2023); Lopez et al. (2025)
Tecnologias da Indústria 5.0	IoT, *blockchain*, robótica, manufatura aditiva.	Usina fotovoltaica; SAP global.	Pontos de EPIs automatizados; sensores IoT ativos.	Fukuda (2020); Leon et al. (2024); Karmaker et al. (2023)
Integração EC–I5.0	Manufatura aditiva reduzindo resíduos; rastreabilidade digital.	Hub América; integração regional e digital; Eficiência energética.	*Layout* produtivo otimizado; áreas seguras e sinalizadas; Dados em tempo real.	Ahmad et al. (2023); Ivanov (2022); Mukherjee et al. (2023)

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Entre as principais evidências observadas destaca-se a utilização da manufatura aditiva como estratégia para redução de desperdícios e otimização do uso de recursos produtivos. Conforme apontado pelo gestor ambiental, essa tecnologia contribui para minimizar retrabalhos, reduzir perdas de materiais e ampliar a eficiência operacional, alinhando-se às discussões de Ahmad et al. (2023) e Arekrans et al. (2023) sobre o papel da inovação tecnológica na viabilização de modelos circulares.

Outro aspecto refere-se à rastreabilidade dos processos produtivos. A empresa utiliza sistemas integrados de gestão e monitoramento capazes de acompanhar materiais, operações e produtos ao longo do ciclo produtivo e pós-venda, utilizando o sistema SAP e mecanismos digitais de controle por número de série. Essas práticas reforçam o conceito de integração ciberfísica e monitoramento inteligente discutido por Ivanov (2022) e Karmaker et al. (2023), permitindo maior controle operacional e suporte à tomada de decisão sustentável.

A valorização do capital humano também se mostrou um elemento central na integração entre circularidade e tecnologias digitais. Durante a entrevista, o gestor destacou a existência de setores voltados à ergonomia, avaliações prévias antes da implementação de novas tecnologias e políticas de valorização dos colaboradores. Esses aspectos evidenciam que a adoção tecnológica ocorre associada à preocupação com segurança, adaptação operacional e bem-estar organizacional, aproximando-se das discussões de Leon et al. (2024), Dragan et al. (2024) e Modgil et al. (2023).

Além disso, a análise documental identificou iniciativas voltadas à integração regional e digital das operações, incluindo projetos colaborativos e estruturas de gestão compartilhada. Já durante a observação não participante, foi possível identificar a presença de sistemas automatizados, sensores inteligentes, áreas produtivas organizadas para redução de desperdícios e sinalizações voltadas à segurança e eficiência operacional.

A Tabela 4 sintetiza essa análise ao relacionar diretamente as práticas circulares com as tecnologias habilitadoras da Indústria 5.0, evidenciando as interdependências entre inovação tecnológica e sustentabilidade. Essa perspectiva é coerente com as proposições de Ahmad et al. (2023) e Leon et al. (2024), que destacam o papel das tecnologias digitais (como IoT, manufatura aditiva e robótica colaborativa) na viabilização de modelos industriais regenerativos, centrados no ser humano e orientados à eficiência de recursos.

Tabela 4. Impacto observado em relação às práticas de circularidade e tecnologias aplicadas

Prática de Circularidade	Tecnologia 5.0 Aplicada	Impacto Observado	Fundamentação teórica
Reaproveitamento energético	*Big Data* e *blockchain*	Energia mais limpa, controle de fornecedores e eficiência logística	Ahmad et al. (2023), Castro-Lopez et al. (2025), Fukuda (2020), Ivanov (2022), Karmaker et al. (2023), Leon et al. (2024), Mukherjee et al. (2023) e Reike et al. (2023).
Reuso de água	IoT e sensores	Monitoramento hídrico em tempo real	
Redução de resíduos	Manufatura aditiva	Otimização de recursos e eliminação de retrabalhos e sobras	
Segurança ocupacional e Capacitações	Robótica colaborativa e sensores inteligentes	Redução da exposição ao risco e aumento de performance	
Valorização de colaboradores e baixa rotatividade	Plataformas digitais e automação ergonômica	Acesso facilitado a EPIs, rastreabilidade de uso e promoção do bem-estar	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

De maneira geral, os resultados demonstram que a Empresa XYZ apresenta convergência entre transformação digital e sustentabilidade industrial, consolidando um modelo operacional orientado simultaneamente pela eficiência tecnológica, circularidade e centralidade humana. Essa integração reforça o potencial da indústria 5.0 como mecanismo de fortalecimento das práticas de economia circular no contexto industrial.

4.4 Desafios e Oportunidades da Integração entre EC e I5.0

Os resultados também permitiram identificar desafios e oportunidades relacionados à integração entre economia circular e indústria 5.0 no contexto da Empresa XYZ. Entre os

principais desafios mencionados pelo entrevistado destaca-se a necessidade de constante atualização tecnológica diante da elevada competitividade do cenário industrial global, especialmente em relação à velocidade das transformações produtivas e digitais observadas em mercados internacionais.

Esse resultado reforça as discussões de Castro-Lopez et al. (2025) e Karmaker et al. (2023), que apontam que a implementação de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis em economias emergentes ainda enfrenta obstáculos relacionados à infraestrutura, custos de inovação e necessidade de qualificação profissional. Além disso, questões regulatórias e ambientais também representam fatores para consolidação de modelos produtivos circulares e tecnologicamente integrados (Alaranta & Turunen, 2021; Pfeffer et al., 2025; Toboso-Chavero et al., 2025).

Apesar desses desafios, os dados evidenciam que a Empresa XYZ identifica diversas oportunidades estratégicas associadas à convergência entre circularidade e digitalização. Entre elas destacam-se os investimentos em energia solar, reuso de água, aproveitamento energético por meio do biometano e fortalecimento de parcerias com cooperativas e fornecedores locais voltados à gestão de resíduos e reciclagem.

Essas iniciativas demonstram que a organização compreende a sustentabilidade não apenas como exigência ambiental, mas como elemento estratégico para fortalecimento da competitividade, inovação e eficiência operacional. Nesse sentido, observa-se alinhamento com a perspectiva de Leon et al. (2024) e Ahmad et al. (2023), que compreendem a indústria 5.0 como um modelo capaz de integrar desenvolvimento tecnológico, regeneração ambiental e valorização humana.

Por fim, os resultados indicam que a empresa apresenta um modelo organizacional orientado à construção de operações mais inteligentes, sustentáveis e resilientes. A integração entre práticas de economia circular e tecnologias da indústria 5.0 demonstra potencial para fortalecer a inovação e ampliar a capacidade das organizações em responder aos desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade e transformação digital.

5 Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo realizar o diagnóstico sobre o alinhamento das práticas de EC com a I5.0 em uma empresa de grande porte do setor metalmecânico no Brasil, identificada neste trabalho como Empresa XYZ. A partir da abordagem qualitativa adotada, foi possível compreender como estratégias de circularidade, digitalização e centralidade humana se articulam no contexto operacional da organização.

Os resultados evidenciaram que a empresa apresenta elevado nível de maturidade em relação às práticas de economia circular, especialmente no que se refere ao reaproveitamento de resíduos, reuso de água, recuperação energética e desenvolvimento de ações voltadas à sustentabilidade operacional. Paralelamente, observou-se ampla incorporação de tecnologias associadas à indústria 5.0, incluindo IoT, robótica colaborativa, *blockchain*, sistemas automatizados e manufatura aditiva, aplicadas tanto à otimização produtiva quanto à segurança e rastreabilidade dos processos.

A análise integrada dos dados demonstrou que a convergência entre economia circular e indústria 5.0 ocorre de maneira sistêmica na Empresa XYZ, reforçando a integração entre eficiência operacional, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental. Nesse sentido, os resultados corroboram a literatura que compreende a indústria 5.0 como um modelo industrial orientado não apenas pela automação, mas também pela sustentabilidade, resiliência e centralidade humana.

Como contribuição científica, o estudo amplia as discussões sobre a aplicação prática da integração entre circularidade e tecnologias digitais no contexto industrial brasileiro, oferecendo evidências empíricas sobre a compatibilidade entre esses modelos. Em termos gerenciais, os resultados podem auxiliar organizações interessadas em desenvolver estratégias sustentáveis associadas à transformação digital e à inovação operacional.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros ampliem a investigação para outros segmentos industriais e diferentes contextos organizacionais, permitindo análises comparativas relacionadas aos níveis de maturidade tecnológica, sustentabilidade e integração entre economia circular e indústria 5.0.

Agradecimentos
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Conflitos de interesse
Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de Aprovação Ética
De acordo com o Artigo 1º da Resolução nº 510 de 7 de abril de 2016, expedida pelo Conselho Nacional de Saúde do Brasil, o Comitê de Ética em Pesquisa ou os sistemas do Conselho Nacional de Saúde não registram ou avaliam pesquisas de opinião pública com participantes não identificados, pesquisas que exploram bases de dados agregadas sem a possibilidade de identificação dos participantes, ou pesquisas que visam aprofundar teoricamente situações que surgem casual e contingentemente na prática profissional, sem revelar dados que possam identificar seus participantes. Esta pesquisa, portanto, não foi submetida ao Comitê de Ética em Pesquisa.
Nota. Resolução nº 510 do Conselho Nacional de Saúde do Brasil, disponível em https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/22917581.

Utilização de ferramentas de inteligência artificial
Durante a preparação do manuscrito, a ferramenta de inteligência artificial Scopus AI (Elsevier, 2026) foi utilizada exclusivamente para revisar preliminarmente a literatura, sintetizar conceitos e auxiliar na organização textual.

Referências

Ahmad, F., Bask, A., Laari, S., & Robinson, C. V. (2023). Business management perspectives on the circular economy: Present state and future directions. *Technological Forecasting and Social Change*, *187*, 122182. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122182

Alaranta, J., & Turunen, T. (2021). How to reach a safe circular economy?—Perspectives on reconciling the waste, product and chemicals regulation. *Journal of Environmental Law*, *33*(1), 113-136. https://doi.org/10.1093/jel/eqaa016

Andika, A., Perdana, T., Chaerani, D., & Utomo, D. S. (2025). Transitioning towards zero waste in the agri-food supply chain: a review of sustainable circular agri-food supply chain. *Sustainable Futures*, *10*, 100917. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100917

Arekrans, J., Ritzén, S., & Laurenti, R. (2023). The role of radical innovation in circular strategy deployment. *Business Strategy and the Environment*, *32*(3), 1085-1105. https://doi.org/10.1002/bse.3108

Bachmann, M., Zibunas, C., Hartmann, J., Tulus, V., Suh, S., Guillén-Gosálbez, G., & Bardow, A. (2023). Towards circular plastics within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, *6*(5), 599-610. https://doi.org/10.1038/s41893-022-01054-9

Bardin, L. (2020), *Análise de Conteúdo,* (5th Edition). Edições 70.

Battini, D., Berti, N., Finco, S., Zennaro, I., & Das, A. (2022). Towards industry 5.0: A multi-objective job rotation model for an inclusive workforce. *International Journal of Production Economics*, *250*, 108619. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108619

Burgos, D., & Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *152*, 102412. https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102412

Castro-Lopez, A., Entrialgo, M., Liao, C. T., & Santos-Vijande, M. L. (2025). Towards circular economy through innovation: the role of entrepreneurial orientation and human resource management. *International Entrepreneurship and Management Journal*, *21*(1), 36. https://doi.org/10.1007/s11365-024-01032-x

Chaudhary, S., Saha, A. K., & Sharma, M. K. (2025). A circular economy based nonlinear corrugated waste management system using Fermatean bipolar hesitant fuzzy logic. *Scientific Reports*, *15*(1), 7099. https://doi.org/10.1038/s41598-025-90948-7

Confederação Nacional da Indústria (2025). *Perfil setorial da indústria: Indústria da Transformação – Metalurgia.* https://perfilsetorialdaindustria.portaldaindustria.com.br/categorias/24-metalurgia/

Demo, P. (2022). *Avaliação qualitativa*. Autores Associados.

Dragan, G. B., Arfi, W. B., Tiberius, V., Ammari, A., & Ferasso, M. (2024). Acceptance of circular entrepreneurship: Employees' perceptions on organizations' transition to the circular economy. *Journal of Business Research*, *173*, 114461. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114461

Elsevier. (2026). *Scopus AI* (Large language model). Available in: www.scopus.com

Fukuda, K. (2020). Science, technology and innovation ecosystem transformation toward society 5.0. *International journal of production economics*, *220*, 107460. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.033

Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Ediitora Atlas SA.

Grafström, J., Poelzer, G., & Pettersson, J. (2026). Barriers to circularity in the metals industry: an analytical framework of feedback and lock-in effects. *Mineral Economics*, *39*(1), 193-205. https://doi.org/10.1007/s13563-025-00540-8

Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *International Journal of Production Research*, *61*(5), 1683–1695. https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2118892

Kaewunruen, S., O'Neill, C., & Sengsri, P. (2025). Digital twin-driven strategic demolition plan for circular asset management of bridge infrastructures. *Scientific Reports*, *15*(1), 10554. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94117-8

Karmaker, C. L., Bari, A. M., Anam, M. Z., Ahmed, T., Ali, S. M., de Jesus Pacheco, D. A., & Moktadir, M. A. (2023). Industry 5.0 challenges for post-pandemic supply chain sustainability in an emerging economy. *International Journal of Production Economics*, *258*, 108806. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108806

Khan, S. A. R., Shah, A. S. A., Yu, Z., & Tanveer, M. (2022). A systematic literature review on circular economy practices: challenges, opportunities and future trends. *Journal of Entrepreneurship in Emerging Economies*, *14*(5), 754-795. https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2021-0040

Leon, R. D., Rodríguez-Rodríguez, R., & Alfaro-Saiz, J. J. (2024). Preparing for industry 5.0: A methodology for avoiding corporate amnesia. *Industrial Management & Data Systems*, *124*(1), 120-139. https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2023-0159

Maddikunta, P. K. R., Pham, Q. V., Deepa, N., Dev, K., Gadekallu, T. R., Ruby, R., & Liyanage, M. (2022). Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. *Journal of industrial information integration*, *26*, 100257. https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257

Malhotra, N. K. (2019). *Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada*. Bookman Editora.

Massari, G. F., & Giannoccaro, I. (2021). Investigating the effect of horizontal coopetition on supply chain resilience in complex and turbulent environments. *International Journal of Production Economics*, *237*, 108150. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108150

Modgil, S., Singh, R. K., & Agrawal, S. (2025). Developing human capabilities for supply chains: an industry 5.0 perspective. *Annals of Operations Research*, *348*(3), 2075-2105. https://doi.org/10.1007/s10479-023-05245-1

Mohan, S. V., & Katakojwala, R. (2021). The circular chemistry conceptual framework: A way forward to sustainability in industry 4.0. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *28*, 100434. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100434

Mukherjee, A. A., Raj, A., & Aggarwal, S. (2023). Identification of barriers and their mitigation strategies for industry 5.0 implementation in emerging economies. *International Journal of Production Economics*, *257*, 108770. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108770

Pfeffer, D., Reike, D., & Bening, C. R. (2025). Analyzing policy mixes for the circular economy transition: The case of recycled plastics in electronics. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *56*, 100982. https://doi.org/10.1016/j.eist.2025.100982

Pronti, A., Zecca, E., & Antonioli, D. (2024). Micro is beautiful. Adoption of eco-innovations in micro-firms. *Business Strategy and the Environment*, *33*(2), 1341-1368. https://doi.org/10.1002/bse.3553

Reike, D., Hekkert, M. P., & Negro, S. O. (2023). Understanding circular economy transitions: the case of circular textiles. *Business Strategy and the Environment*, *32*(3), 1032-1058. https://doi.org/10.1002/bse.3114

Santhi, A. R., & Muthuswamy, P. (2023). Industry 5.0 or industry 4.0 S? Introduction to industry 4.0 and a peek into the prospective industry 5.0 technologies. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *17*(2), 947-979. https://doi.org/10.1007/s12008-023-01217-8

SEBRAE (2026). *Saiba mais sobre o mercado metalmecânico: inovação, sustentabilidade e inserção global 2026-2030.* https://inteligenciademercado.rj.sebrae.com.br/metal-mecanico/Saiba-mais-sobre-o-Mercado-Metalmecanico-inovacao-sustentabilidade-e-insercao-global-2026-2030

Sharma, A., Adhikary, A., & Borah, S. B. (2020). Covid-19′ s impact on supply chain decisions: Strategic insights from NASDAQ 100 firms using Twitter data. *Journal of business research*, *117*, 443-449. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.035

Spellmeier, J. P., Kuntz, L. Z., Rosa, C. B., Valentim, A. M., Baldessarelli, G. M., & Rediske, G. . (2025). Desafios na implementação da Indústria 4.0 no setor metalmecânico brasileiro: análise de barreiras de entrada. *Revista Produção Online*, *25*(2), 5436 . https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i2.5436

Toboso-Chavero, S., de Jong, M., Schraven, D., & Zisopoulos, F. K. (2025). Urban circular economy initiatives: Development and application of a unified theoretical framework. *Cities*, *167*, 106371. https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106371

Uwuigbe, U., Issah, O., Ranti, U. O., Zubeiru, M., Anaba, S., & Seidu, A. A. J. (2025). Circular economy: a bibliometric review of research in emerging economies (2010-2024). *International Journal of Energy Economics and Policy*, *15*(1), 77-89. https://doi.org/10.32479/ijeep.17021

Yin, R.K. (2018), *Case study research and applications* (6th edition). Sage Publication.

Zhang, C., Zurcher, C. N., Climent, D. M., & Young, S. B. (2026). Mapping voluntary sustainability standard systems in the mining, minerals, and metals sectors. *Resources Policy*, *116*, 105922. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2026.105922