



ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 PARA PROMOVER PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS

ADOPTION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES TO PROMOTE SUSTAINABLE PRACTICES

ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0 PARA PROMOVER PRÁCTICAS SOSTENIBLES

RESUMO

Objetivo: Analisar a adoção das tecnologias da indústria 4.0 para promover práticas sustentáveis, nos últimos cinco anos, em uma indústria química fabricante de adesivos.

Metodologia: Estudo de caso único, com abordagem qualitativa, coleta de dados empíricos por meio de quatro entrevistas em profundidade, usando roteiro com dez perguntas, observação sistemática participante e levantamento documental, submetendo os dados à análise de conteúdo.

Resultados: Identificou-se que a empresa utiliza algumas tecnologias da indústria 4.0 visando à redução do impacto ambiental, como big data e IoT. Devido ao porte da empresa e cenário de limitação de recursos, os investimentos em novas tecnologias e incorporação de práticas sustentáveis são restritos.

Limitações: Por se tratar de um estudo de caso, os resultados obtidos não são generalizáveis.

Implicações práticas: Os resultados fornecem aos gestores das organizações que desejam adotar tecnologias da indústria 4.0 elementos para análise e reflexão, para elaborar seus próprios planos e orientar procedimentos operacionais.

Implicações teóricas: Os resultados facultam o avanço do conhecimento sobre adoção das tecnologias da indústria 4.0 em empresas de pequeno porte e setor econômico similares.

Originalidade / valor: O estudo pode ser considerado original, pois foi realizada uma busca na base Scopus, em março de 2024, selecionando artigos em inglês, entre 2019 e 2023, obtendo apenas 15 artigos, o que evidencia a escassez de pesquisas sobre o tema.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Indústria Química. Sustentabilidade. Tecnologias.

Gustavo de Oliveira Hanauer

Mestrando

Universidade Feevale – Brasil

gustavo.hanauer@icloud.com

Dusan Schreiber

Doutor

Universidade Feevale – Brasil

dusan@feevale.br

Luciane Pereira Viana

Pós-Doutora

Universidade Feevale – Brasil

viana.luciane.lu@gmail.com

Submetido em: 25/07/2024

Aprovado em: 14/11/2024

Como citar: Hanauer, G. de O., Schreiber, D., & Viana, L. P. (2024). Adoção de Tecnologias da Indústria 4.0 para Promover Práticas Sustentáveis. *Revista Alcance (online)*, 31(3), 68-82. Doi: [https://doi.org/10.14210/alcance.v31n3\(set/dez\).68-82](https://doi.org/10.14210/alcance.v31n3(set/dez).68-82)





ABSTRACT

Objective: To analyze the adoption of industry 4.0 technologies to promote sustainable practices, in the last five years, in a chemical industry that manufactures adhesives.

Methodology: Single case study, with a qualitative approach, collecting empirical data through four in-depth interviews, systematic participant observation and documentary survey, submitting the data to content analysis.

Results: It was identified that the company uses some I4.0 technologies to reduce environmental impact, such as big data and IoT. Due to the size of the company and limited resources, investments in new technologies and incorporation of sustainable practices are restricted.

Limitations: As this is a case study, the results obtained cannot be generalized.

Practical implications: The results provide managers of organizations that wish to adopt industry 4.0 technologies with elements for analysis and reflection, to develop their own plans and guide operational procedures.

Theoretical implications: The results provide the advancement of knowledge about the adoption of industry 4.0 technologies in small companies and similar economic sectors.

Originality/value: The study can be considered original, as a search was carried out in the SCOPUS database in March 2024, selecting articles in English between 2019 and 2023, obtaining only 15 articles, which highlights the scarcity of research on the topic.

Keywords: Chemical industry. Industry 4.0. Sustainability. Technologies.

RESUMEN

Objetivo: Analizar la adopción de tecnologías de industria 4.0 para promover prácticas sustentables, en los últimos cinco años, en una industria química fabricante de adhesivos.

Metodología: Estudio de caso único, con enfoque cualitativo, recogiendo datos empíricos a través de cuatro entrevistas en profundidad,

observación participante sistemática y encuesta documental, sometiendo los datos a análisis de contenido.

Resultados: Se identificó que la empresa utiliza algunas tecnologías I4.0 para reducir el impacto ambiental, como big data e IoT. Debido al tamaño de la empresa y recursos limitados, las inversiones en nuevas tecnologías y la incorporación de prácticas sustentables están restringidas.

Limitaciones: Al tratarse de un estudio de caso, los resultados obtenidos no se pueden generalizar.

Implicaciones prácticas: Los resultados proporcionan a los directivos de organizaciones que desean adoptar tecnologías de la industria 4.0 elementos de análisis y reflexión, para desarrollar sus propios planes y guiar procedimientos operativos.

Implicaciones teóricas: Los resultados proporcionan el avance del conocimiento sobre la adopción de tecnologías de la industria 4.0 en pequeñas empresas y sectores económicos similares.

Originalidad/valor: El estudio puede considerarse original, ya que se realizó una búsqueda en la base de datos SCOPUS en marzo de 2024, seleccionando artículos en inglés entre 2019 y 2023, obteniendo solo 15 artículos, lo que resalta la escasez de investigaciones sobre el tema.

Palabras clave: Industria 4.0. Industria química. Sostenibilidad. Tecnologías.

INTRODUÇÃO

O setor químico é considerado muito importante para a economia global, pois abrange outros diversos setores industriais com sua produção e fornecimento de variados produtos e serviços. Falkenroth-Naidu *et al.* (2023), através da McKinsey consultoria, apresentam que a indústria química global evoluiu consideravelmente nos últimos anos, com quase 25% de crescimento em 2021, por consequência da alta na demanda de produtos químicos nos setores automotivos, construção, eletrônicos e outros. O Brasil ocupa o sexto lugar no ranking de maiores geradores de receita da indústria química mundial, sendo o



setor químico importantíssimo para a economia brasileira, apresentando um faturamento de 187 bilhões de dólares em 2022. Para o setor de produtos químicos de uso industrial (que é o caso da empresa analisada), foram faturados mais de 88 bilhões de dólares, apresentando um crescimento de quase 24,6% em relação à 2021 (Abiquim, 2022).

Conforme o Sebrae (2023), o investimento em inovação para fomentar e sustentar a capacidade competitiva do setor químico brasileiro é imprescindível para que as empresas se mantenham ativas no mercado. Galembeck (2017) complementa que as empresas e gestores devem observar cada vez mais as tendências praticadas no exterior, para, então, propor mudanças nas operações empresariais brasileiras e, aos poucos, melhorar ainda mais o cenário do setor no país.

A indústria 4.0 (I4.0) está revolucionando o setor industrial ao integrar tecnologias avançadas para melhorar a eficiência e a sustentabilidade. No contexto da indústria química, a adoção dessas tecnologias pode oferecer soluções inovadoras para reduzir impactos ambientais. Ao adotar processos produtivos menos agressivos ao meio ambiente, através das tecnologias da I4.0, as empresas podem transformar a sua operação combinando manufatura e sustentabilidade (Silva, Silva, & Ometto, 2016). De acordo com os autores, a sustentabilidade busca equilibrar meio ambiente, economia e sociedade, enquanto a manufatura envolve o uso de mão de obra, ferramentas e equipamentos na produção de bens ou serviços para uso ou venda. A manufatura sustentável, ou "manufatura verde", foca em questões ambientais, evoluindo com novas práticas de gestão ambiental. Essa abordagem promove produção mais limpa, melhor aproveitamento dos recursos naturais e redução na geração de resíduos (Silva, Silva, & Ometto, 2016).

As tecnologias da indústria 4.0 contribuem para a sustentabilidade das empresas, seja no desenvolvimento de produtos sustentáveis, que não prejudicam o meio ambiente, ou de processos operacionais com práticas mais verdes e responsáveis, além da percepção de que a implementação de novas tecnologias nas operações facilita o desenvolvimento de diferentes maneiras de atingir os resultados, através da reestrutu-

ração dos seus processos (Hayes, 2006; Schreiber, 2022). Dentro deste contexto, o termo indústria 4.0 compreende o conjunto de tecnologias digitais de conectividade emergentes e inovadoras, cujo propósito é modificar as operações das empresas tradicionais, não se referindo a uma indústria propriamente dita (Schreiber, 2022). Ainda conforme o autor, implementar uma integração da I4.0 com sucesso na operação da empresa é possível, desde que haja uma preparação prévia e um estudo cauteloso sobre as mudanças que podem, ou não, acontecer.

Diante disso, este estudo foi realizado em uma indústria química, a qual, por motivos de preservação de identidade, é identificada neste estudo com o codinome Empresa W. A empresa está localizada na região do Vale do Rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul, cuja atividade principal é a fabricação de adesivos e solventes. Este estudo visou a analisar a adoção de tecnologias da indústria 4.0 para promover práticas sustentáveis em uma indústria química de adesivos. Este foco é crucial, devido ao potencial dessas tecnologias em mitigar impactos ambientais e melhorar a competitividade. Em um primeiro momento, foram analisadas quais tecnologias da indústria 4.0 foram adotadas, visando a mitigar os impactos ambientais da operação, dentro de um período de cinco anos, para, então, relacionar com a visão dos especialistas do setor, acrescido da teoria, a fim de apresentar ações que possam contribuir para a implementação de novas tecnologias e de práticas mais sustentáveis.

Embora a literatura tenha explorado amplamente a I4.0, há uma lacuna significativa na aplicação dessas tecnologias em pequenas empresas do setor químico, especialmente no que diz respeito à sustentabilidade. Sendo assim, a escolha deste assunto em especial justifica-se para o meio acadêmico e científico, bem como para o setor químico em geral, pois contribui para o avanço do conhecimento sobre a operação de uma empresa de pequeno porte do segmento, evidenciando as inovações realizadas nos últimos cinco anos e as tecnologias da indústria 4.0 implementadas no período, que resultaram em práticas mais verdes e na mitigação do impacto ambiental. Além disso, o estudo pode ser considerado original, pois foi realizada uma busca na base Scopus, em março de 2024, utilizando



palavras-chave combinadas, como *Technologies AND industry 4.0 AND sustainability*, *Industry 4.0 chemical AND Industry AND sustainability* e *Industry 4.0 chemical AND Industry AND green manufacturing*, aplicando sobre elas os filtros *business* e *environmental science*, selecionando apenas artigos em inglês e publicados entre 2019 e 2023, resultando em 15 artigos, evidenciando a escassez de pesquisas sobre o tema.

Os resultados indicam a utilização de tecnologias, como *big data* e IoT, embora restrições de recursos limitem a adoção mais ampla. Em relação à estrutura deste estudo, ele está estruturado em seções que discutem o referencial teórico utilizado, a metodologia, os resultados e implicações práticas e teóricas, as conclusões e, por fim, as referências bibliográficas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Um tema de que vem chamando a atenção na indústria 4.0 é a manufatura sustentável, (Javaid *et al.*, 2022), a qual busca integrar no setor industrial os valores fundamentais do desenvolvimento sustentável, contribuindo para o aumento da eficiência ambiental, social e econômica. O digital sustentável, a transformação e o desenvolvimento de soluções inteligentes, ofertados pela indústria 4.0, oferecem às empresas a possibilidade de criar modelos de negócios inovadores e menos agressivos ao meio ambiente (Javaid *et al.*, 2022; Ivanov, 2018; Villar *et al.*, 2020).

Diante disso, as inovações da indústria 4.0 devem ser implementadas visando a estabelecer uma base ambiental sustentável. Com o crescente volume de organizações direcionando seus esforços para conciliar objetivos de sustentabilidade impostos pelo mercado ou por legislações, a I4.0 está transformando o cenário tradicional estabelecido e desafiando práticas já existentes, oferecendo a *expertise* e diretrizes necessárias para aprimorar a eficiência da sustentabilidade, principalmente no âmbito de produção industrial (Ghobakhloo, 2020; Javaid *et al.*, 2022; Oláh *et al.*, 2020).

Conforme Javaid *et al.* (2022), os estágios fundamentais nos setores de fluxo de processos da indústria 4.0, rumo à sustentabilidade, começam pelas ferramentas da I4.0, passam pelos

processos de integração e finalizam em resultados sustentáveis. Esse processo tem início com a adoção de dimensões inteligentes e digitais, promovendo uma cultura eficiente e sustentável. As inovações inteligentes em métodos e procedimentos são componentes cruciais para a produção de bens, que promovem a preservação ambiental, portanto, na etapa de integração, aborda-se a interação entre humanos e máquinas, bem como a gestão adequada de tempo e virtualização, caracterizadas pelas fábricas inteligentes. Por fim, os resultados sustentáveis se refletem na economia, segurança, saúde dos trabalhadores e na preservação ambiental (Ingaldi & Ulewicz, 2019; Javaid *et al.*, 2022; Machado, Winroth, & Silva, 2020).

Com intenções de estabelecer ambientes sustentáveis, um dos focos da I4.0 é mudar a atual arquitetura dos processos das empresas. De acordo com Javaid *et al.* (2022), os principais desenvolvimentos da I4.0 para criar um ambiente sustentável são os seguintes:

a) Produção inteligente utilizando tecnologias da indústria 4.0, caracterizada pela convergência da tecnologia, trabalhando de forma integrada e em tempo real, com o entendimento de que o trabalho humano e os procedimentos tecnológicos são perfeitamente combinados, sendo necessário integrá-los;

b) Indústria 4.0 para a indústria da água, oferecendo possibilidades para melhorar o controle de ativos, como o rastreamento em tempo real, medição inteligente de água e manutenção preventiva acionada por alarme. Pode facilitar no tempo de reação climática, melhorar respostas comunitárias e redes de contato e garantir a disponibilidade contínua de água;

c) Indústria 4.0 para reduzir o consumo de energia, utilizando a tecnologia de IoT, por exemplo, para construir cidades inteligentes que visam a melhorar a qualidade de vida e reduzir o consumo de energia. Com a visão de cidades inteligentes, a infraestrutura e a capacidade de entrega de recursos seriam melhoradas;

d) Transparência de informações por meio da indústria 4.0, com a interligação e a transparência das informações permitindo tomada de decisão dentro e fora das instalações de produção, melhorando a eficiência. Com big data, por



exemplo, pode-se implementar fábricas inteligentes, onde os dados dos sensores da máquina de produção são analisados para antecipar a necessidade de operações de manutenção e reparo. A otimização da cadeia de abastecimento, melhorando os preços, a previsão de falhas e a criação de produtos, também são exemplos.

e) Indústria 4.0 para melhorar a qualidade do ar, sendo que a rede de fornecimento de energia estável pode ser vinculada à energia virtual de usinas de infraestruturas de energia renovável, como painéis solares. Essas instalações utilizam tecnologias baseadas em redes inteligentes, e as soluções automatizadas podem reduzir significativamente as emissões de gases na cidade e os índices de qualidade do ar. Com uma gestão de tráfego inteligente e menos congestionamentos nas estradas, reduz-se o consumo de energia, os resíduos e as emissões de carbono nas cidades;

f) Interconexão da cadeia de suprimentos usando indústria 4.0, pois sem os sensores adequados, as decisões podem ser tomadas de maneira equivocada através de resultados imprecisos.

Dessa forma, a integração da sustentabilidade com a indústria 4.0 apresenta uma promissora perspectiva para as empresas avançarem em direção a práticas mais responsáveis e eficientes. Como aplicações significativas da indústria 4.0 para o desenvolvimento de um ambiente sustentável, é possível citar: (i) a melhora na capacidade de inovação ambiental, utilizando as tecnologias da I4.0 para transferir conhecimento entre pessoas e máquinas, melhora nos processos automatizados, aumentando a eficiência e reduzindo a produção de resíduos, contemplando tecnologias como a IoT, gêmeos digitais e sistemas ciberfísicos; (ii) minimizar o desperdício, utilizando o pensamento enxuto para comprar menos, desde embalagens até matérias-primas e energia, pois a resposta a alterações climáticas também pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a rentabilidade e desenvolver uma imagem verde e desenvolvimento sustentável. O conceito *big data* é uma das tecnologias que poderia ser utilizada e; (iii) reciclagem de resíduos, apoiando-se em práticas como a ampliação e reutilização de matérias-primas por meio de reciclagem, uso interno de resíduos e interdependência de mer-

cados para subprodutos. Como tecnologia, pode-se utilizar as análises por robôs (Chen *et al.*, 2021; Di Carlo *et al.*, 2021; Sołtysik-Piorunkiewicz & Zdonek, 2021; Upadhyay *et al.*, 2021).

Javid *et al.* (2022) destacam, ainda, que um dos principais desafios enfrentados pelas empresas ao adotar tanto a indústria 4.0 quanto a sustentabilidade 4.0 está relacionado à necessidade de investimentos substanciais em tecnologias e infraestrutura. A implementação de sistemas avançados de monitoramento, coleta de dados e análise requer um investimento considerável em recursos financeiros e humanos. A crescente implementação da automação industrial e da logística reversa, impulsionada pelos benefícios de redução de custos, por exemplo, já serve para evidenciar o potencial das tecnologias da I4.0 para tornar as organizações mais sustentáveis (Fatorachian & Kazemi, 2018; Schreiber, 2022). Oliveira, França e Rangel (2018) complementam que a redução do impacto ambiental, ao combinar o modelo de fábrica inteligente com a integração de sistemas físicos e virtuais, integrando-os com práticas de análise de ciclo de vida de produtos e de *ecodesign*, podem trazer muitos benefícios para as empresas. Moeuf *et al.* (2017) corroboram tais afirmações com o conceito de que a adoção da indústria 4.0 facilita a implementação de práticas ambientalmente sustentáveis, resultando em produtos e operações que não prejudicam o meio ambiente.

Ghobakhloo (2020) aponta que a sustentabilidade e os impactos da indústria 4.0 estão intrinsecamente relacionados no cenário empresarial, com as tecnologias da I4.0, que são caracterizadas pela digitalização e automação de processos, não sendo percebidas apenas como uma revolução tecnológica, mas também como uma oportunidade para promover práticas mais sustentáveis. A busca por soluções inovadoras e sustentáveis na implementação da indústria 4.0 nas empresas é fundamental para garantir o desenvolvimento econômico e tecnológico, sem comprometer os recursos naturais e o bem-estar das gerações futuras (Beier *et al.*, 2020; Ghobakhloo, 2020; Kamble, Gunasekaran, & Dhone, 2019).

Diante desse contexto, Ghobakhloo (2020) destaca os impactos que as tecnologias da indústria 4.0 podem apresentar ao meio empresarial,



no âmbito de sustentabilidade:

a) A sustentabilidade energética e de recursos: a indústria 4.0 apoia a sustentabilidade ambiental pela energia sustentável e pela transformação de recursos, alterando a maneira como a sociedade produz, comercializa, consome e vive. As implicações de sustentabilidade não se limitam apenas à sustentabilidade energética, podendo apresentar sistemas de produção mais eficientes, o surgimento de tecnologias avançadas de fabricação digital (CPPS, manufatura aditiva e robótica inteligente) e sistemas inteligentes de planejamento e alocação de recursos;

b) O desenvolvimento da responsabilidade ambiental: o desenvolvimento de práticas reativas e proativas "amigas" do ambiente são implicações que a indústria 4.0 e a digitalização oferecem. As tecnologias de fabricação aditiva, por exemplo, podem facilitar o desenvolvimento de novos produtos ecológicos, além de beneficiar práticas de gestão ambiental, como a avaliação do ciclo de vida e capacidades de integração e gestão de dados (IoT). Ademais, os impactos na produtividade da I4.0, gerados pela gestão colaborativa da produção, pelas capacidades de gestão do conhecimento na cadeia de abastecimento e flexibilidade de produção, podem oferecer várias oportunidades de sustentabilidade ambiental em termos de redução de resíduos e eficiência de materiais;

c) Criação de empregos: a indústria 4.0 projeta uma redução de empregos de baixa a média qualificação, mas compensa essa perda relacionada à automação com a criação de novas oportunidades na área de informática, mecatrônica, engenharia de processos e integração de sistemas. As implicações da I4.0 para a sustentabilidade social não se limitam apenas à criação de oportunidade de empregos, mas contribuem para uma economia mais verde e sustentável, levando à criação de oportunidades relacionadas com a produção sustentável;

d) Melhoria do bem-estar social: as tecnologias e a digitalização podem oferecer oportunidades para a despolarização do rendimento e da riqueza, pois as oportunidades e o aumento dos salários-mínimos, devido à utilização intensiva de competências em novos empregos no contexto da I4.0, podem abordar positivamente a ques-

tão da desigualdade econômica. Espera-se que os novos modelos de *marketing* e distribuição, bem como, a eficiência de materiais, recursos e produção oferecida pela produção digitalizada inteligente melhorem a acessibilidade global e a acessibilidade dos bens e serviços.

A transição para a indústria 4.0 e a subsequente digitalização industrial têm o potencial de abrir portas para a sustentabilidade, como a otimização dos recursos e o crescimento econômico global. No entanto, para que a I4.0 possa desempenhar plenamente seu papel na promoção da sustentabilidade, é necessário que a transformação digital alcance um nível de maturidade mais avançado, o qual pode ser alcançado através do desenvolvimento de recursos humanos capacitados para lidar com as demandas da digitalização (Jabbour *et al.*, 2018; Ghobakhloo, 2020; Wang & Shen, 2016; Xu, Xu, & Li, 2018).

Os desafios do desenvolvimento sustentável podem ser considerados um ponto de partida da maioria das inovações das indústrias, as quais estão intensificando esforços para envolver as tecnologias da indústria 4.0 na sua operação visando a superar desafios ambientais globais, como alterações climáticas, falta de água, poluição ambiental e esgotamento de recursos. Diante desse contexto, percebe-se que a indústria química global está entrando em uma nova fase de desenvolvimento, cujo ritmo e a direção serão definidos, à medida em que são implementadas as tecnologias da I4.0 nas empresas. Com a crescente pressão das exigências ambientais da comunidade mundial, o setor químico precisa encontrar maneiras de tornar o seu negócio mais verde e sustentável, e através da digitalização dos processos de negócios e implementação das tecnologias da I4.0, por exemplo, acelera-se a criação de novos valores e novas oportunidades para a indústria (Gawel & Herweijer, 2020; Shevtsova, Shvets, & Kasatkina, 2020).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste estudo é utilizada uma abordagem qualitativa, de método descritivo, com estratégia de estudo de caso único, técnicas de coleta de dados por meio de entrevistas em profundidade, observação sistemática participante e levantamento documental. Foi utilizada como técnica de



análise de dados a análise de conteúdo (Bardin, 2011; Gil, 2008; Malhotra, 2019; Prodanov & Freitas, 2013). Estudou-se uma indústria química de adesivos e solventes de pequeno porte, identificada neste estudo com o codinome Empresa W, localizada na região do Vale do Rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul. A empresa está no mercado brasileiro há mais de 30 anos, atendendo a variados segmentos.

As entrevistas buscavam entender o funcionamento da operação, atualmente, as tecnologias utilizadas no processo operacional e os incentivos para a utilização de novas tecnologias. A escolha do entrevistado que atua na empresa baseou-se pelo critério de tempo de atuação e pela participação em decisões estratégicas, bem como possuir formação acadêmica superior. Portanto, foi definido que o entrevistado seria o químico responsável, que atua em decisões estratégicas há mais de dez anos e possui amplo conhecimento sobre a operação. O entrevistado é identificado no decorrer do estudo pela sigla P1.

Além do químico (P1), outras três pessoas externas à empresa foram entrevistadas, ou seja, sem vínculo e que não são colaboradores. Estes entrevistados estão identificados pelas siglas P2, P3, P4. O entrevistado P2 é proprietário e químico responsável de uma indústria química de porte semelhante à empresa estudada, atuante no mercado há mais de 25 anos com fabricação de saneantes, localizada na mesma região da Empresa W, e cujo objetivo da entrevista foi obter informações sobre outra indústria química de porte e atividade muito próximas, visando a relacionar com as respostas do entrevistado P1, para verificar similaridade nos processos.

Os outros entrevistados são dois especialistas da área, sendo o primeiro um professor de ensino superior do curso de química industrial da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), de Canoas (RS), atuante na área de química há quase 40 anos, sendo identificado pela sigla P3. O terceiro é professor de ensino superior do curso de Engenharia Química, da Universidade Feevale, de Novo Hamburgo (RS), atuante no setor químico há mais de 20 anos, sendo identificado pela sigla P4. Com os entrevistados P3 e P4, o objetivo era coletar a visão de especialistas sobre o setor,

para entender sobre como seria uma operação de uma indústria química, as particularidades, as tendências e os desafios enfrentados, bem como verificar quais seriam as alternativas de adotar tecnologias da I4.0 em processos operacionais das indústrias do setor. A figura 1 sintetiza as informações dos entrevistados.

Figura 1

Perfil de Entrevistados

ENTREVISTADOS	EMPRESA W	FORMAÇÃO E ATUAÇÃO	EXPERIÊNCIA
P1	É colaborador	Químico Industrial e responsável técnico da Empresa W	10 anos
P2	Não é colaborador	Químico industrial e proprietário de indústria química de porte semelhante à empresa estudada	Aproximadamente 25 anos
P3	Não é colaborador	Especialista, químico industrial, consultor na área e professor de ensino superior	Aproximadamente 40 anos
P4	Não é colaborador	Especialista, engenheiro químico, consultor na área e professor de ensino superior	Aproximadamente 20 anos

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Para a aplicação das entrevistas, estruturou-se um roteiro com dez perguntas, elaboradas com base nos conceitos apresentados na revisão teórica, bem como pela aderência e maior importância para o alcance dos objetivos. O roteiro foi validado com dois *experts*, em nível de doutorado e formação em administração, em relação ao conteúdo, e com três colaboradores da empresa analisada, que ocupam cargos de gestão e vendas, em relação à compreensão da redação de cada uma das perguntas. A referida validação é indicada pela literatura científica, de autores que versam sobre métodos científicos (Gil, 2008; Malhotra, 2019). As entrevistas foram gravadas utilizando o *smartphone* do pesquisador e transcritas, posteriormente, em até 48 horas após a execução.

No dia 4 de abril de 2024, realizou-se a primeira entrevista, com P2, presencialmente na empresa onde é colaborador, com duração de, aproximadamente, 40 minutos. No dia 5 de abril de 2024, realizou-se a entrevista com P3, virtualmente, utilizando a plataforma de reuniões digitais do *Google Meet*, com duração de, aproximadamente, 30 minutos. Por fim, no dia 8 de abril de 2024, foram realizadas as entrevistas com P1,



presencialmente na empresa estudada, com duração de aproximadamente 30 minutos e com P4, de maneira virtual, também utilizando a plataforma do *Google Meet*, com duração de, aproximadamente, 35 minutos. Os dados coletados nas entrevistas foram analisados, de acordo com as técnicas de análise de conteúdo, conforme Bardin (2011).

Para o levantamento documental, elaborou-se um *checklist* de documentos que apoiou a verificação sobre as ferramentas e documentações já existentes e que puderam ser utilizadas como coleta de dados. A empresa disponibilizou documentos que se encontravam nos registros internos, como o sistema gerencial, relatórios de controle de produção, arquivo permanente e demais documentos administrativos. Para a observação sistemática participante, a execução dessa etapa foi realizada pelo autor deste estudo, o qual é colaborador da empresa estudada e possui acesso a informações, dependências da empresa, contato com colaboradores, arquivos internos e também rotinas operacionais. Foi realizado um novo *checklist* contendo os itens que não foram validados no *checklist* para levantamento documental, e que não existem, ou que não foram encontrados nos documentos disponibilizados. A observação, de acordo com Malhotra (2019) foi estruturada, não disfarçada, natural e, por fim, pessoal.

Para a análise de dados deste estudo foi utilizada a técnica de análise de conteúdo, conforme Bardin (2011), tendo o pesquisador se orientado por três etapas: pré-análise, com a elaboração dos roteiros de perguntas para a entrevista, *checklist* para levantamento documental e observação sistemática, com a estruturação das ideias principais; etapa de análise, com a organização dos quadros, tabelas e sintetização das respostas obtidas, a definição das categorias, as quais são: (i) mapeamento das tecnologias utilizadas na operação; (ii) avaliação dos impactos ambientais da operação; e (iii) possibilidade de implementação de novas tecnologias no processo operacional. Por fim, a etapa de tratamento de dados, com a delimitação dos resultados, interpretações e sugestões de melhorias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira pergunta questionou sobre quais tecnologias digitais e de conectividade da indústria 4.0 são utilizadas atualmente no processo das empresas e no setor químico, de um modo mais generalizado. Nessa pergunta, identificou-se uma dificuldade dos entrevistados entenderem quais tecnologias pertenciam ao grupo da I4.0, pode-se perceber que em alguns casos a empresa já utiliza a tecnologia, mas sem o conhecimento de que faziam parte do grupo. Para o melhor entendimento e avaliação por parte dos entrevistados P1 e P2, foi necessário introduzir brevemente alguns conceitos sobre o que são as tecnologias da indústria 4.0, as aplicações e exemplos práticos. A figura 2 ilustra as respostas.

Figura 2

Sugestão para a organização das aulas

Entrevistado	Tecnologias utilizadas	Tecnologias da I4.0 identificadas
P1	Armazenamento de dados em nuvem, sistema de monitoramento de alarme e câmeras com acesso via celular, ligar e desligar lâmpadas remotamente, site <i>online</i> para geração de conteúdo, sensor de nível de caixa d'água com alarme e acionamento de lâmpada.	<i>Big Data</i> , IoT, AI e CPS
P2	Sistema ERP, placas de energia solar, sistema de monitoramento de alarme e câmeras com acesso via celular, sensores de máquinas.	IoT
P3	Robôs e braços mecânicos, automação, painéis centrais, SDCD, acionamento de máquinas e válvulas remotamente, grande processamento e armazenamento de dados.	<i>Big Data</i> , IoT, CPS, robótica e automação
P4	Processamento de dados em larga escala, internet das coisas, armazenamento de dados, acessos remotos, acionamento de dispositivos remotamente, <i>learning machine</i> , integração, sensores	<i>Big Data</i> , IoT, <i>learning machine</i> , CPS, AI.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Conforme a figura 2, para o entrevistado P1, após os exemplos prévios disponibilizados, são utilizadas tecnologias como armazenamento de dados em nuvem (*big data*), sistemas de monitoramento e acionamento via aplicativo de maneira remota (IoT), sensores de níveis e avisos (IoT), e inteligência artificial (AI). Já para o entrevistado P2, percebeu-se a falta de domínio sobre o conceito de indústria 4.0, tendo citado, por exemplo, o sistema ERP da empresa e placas de energia solar. Foi citado também a utilização de sensores em máquinas e aplicativo de acesso



remoto via celular, para o sistema de monitoramento da empresa (IoT). Para os entrevistados P3 e P4, considerando uma visão geral sobre o setor químico e as tecnologias mais utilizadas no setor, percebe-se que as duas respostas são muito parecidas e apoiam o entendimento sobre a similaridade das empresas do segmento, citando tecnologias como a robótica, automação de processos por robôs autônomos (IoT), braços mecânicos, painéis centrais de controle, acionamento de máquinas, válvulas e outros equipamentos remotamente (IoT), armazenamento em nuvem, grande processamento de dados (*big data*), integração de máquinas e computadores (CPS) e machine learning. Portanto, as principais tecnologias identificadas nas respostas são: (i) internet das coisas (IoT); (ii) *Big data*; (iii) inteligência artificial (IA); (iv) sistemas ciberfísicos (CPS); (v) *machine learning*; e (vi) robotização.

É possível representar a tecnologia em três categorias, sendo elas na categoria física, como máquinas e equipamentos; na categoria humana, por habilidades e experiências; na categoria organizacional, pelos sistemas de produção e procedimentos de qualidade. Conforme citado pelos entrevistados, percebe-se a preocupação em mencionar a categoria física, tentando encontrar tecnologias em máquinas e equipamentos, principalmente. Adotar técnicas e ferramentas da I4.0 que aumentem a conectividade e automatizem os processos pode permitir uma flexibilização maior das cadeias, aumentar a capacidade produtiva, e trazer impactos financeiros, sustentáveis e de segurança nos processos (Fatorachian & Kazemi, 2018; Moeuf *et al.*, 2017; Oliveira, França, & Rangel, 2018; Schreiber, 2022).

Os sistemas impulsionados pela inteligência artificial (IA) e pela computação cognitiva (CPS) podem transformar a conectividade das indústrias, a informação e as percepções sobre processos e suas interações. Diante disso, os princípios produtivos de aumento de eficiência, redução de erros humanos e otimização de custos e melhor aproveitamento de recursos, podem ser redirecionados a outro patamar, baseados em sistemas autônomos como CPS, IoT e *big data*, (citados nas respostas), e são fundamentais para o processo de produção eficiente e em larga escala. Além disso, as capacidades de aprendizado de máquina (*machine learning*) conforme iden-

tificado nas respostas, através da aplicação da cognição de máquinas e interação com a internet das coisas, acabam surgindo como alternativas para auxiliar, ou, até mesmo, substituir a tomada de decisão humana (Fatorachian & Kazemi, 2018; Oliveira, França, & Rangel, 2018; Schreiber, 2022).

A próxima pergunta questionou sobre quais etapas do processo operacional seriam beneficiadas a partir da adoção das tecnologias da indústria 4.0, sob a perspectiva de maior eficiência, produtividade, redução de custos e sustentabilidade. As respostas podem ser visualizadas na Figura 3.

Figura 3

Etapas do processo beneficiadas

Entrevistado	Quais etapas do processo operacional seriam beneficiadas a partir da adoção das tecnologias da indústria 4.0, sob a perspectiva de maior eficiência, produtividade, redução de custos e sustentabilidade?
P1	Utilizar a IoT para ligar, desligar e programar os reatores, organizando turnos noturnos para otimizar a produção e o consumo de energia e água; sistema de acompanhamento em tempo real de produção, através de painéis e integração com o sistema, otimizando tempo e aumentando a produtividade; maior assertividade nas etapas de processos químicos e desenvolvimento de produtos através de maior processamento de dados; redução da geração de resíduos sólidos de escritório, com espaço de armazenamento maior na nuvem; a operação produtiva ganharia mais velocidade através da automação de alguns processos manuais, como o envase, por exemplo.
P2	O entrevistado entende que não seria beneficiado com a implementação de alguma das tecnologias apresentadas.
P3	A implementação de sistemas de grande processamento de dados facilitaria a tomada de decisão e assertividade nos processos; a automação de processos através de maquinários autônomos e robotização poderia diminuir o risco humano em operações mais perigosas; a integração de maquinários inteligentes via internet permitiria maior velocidade nos processos; a logística final de processo seria beneficiada através da implementação de processos mais automatizados; controle de estoque, insumos, carregamento de máquinas.
P4	Principalmente processos manuais que hoje utilizam operadores humanos, etapas de logística, transporte e carregamento de matérias-primas, organização interna de layout produtivo, otimização de espaço e agilidade em acionamentos e tomadas de decisão.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).



Nessa pergunta, pode-se perceber a diferença de entendimento sobre as tecnologias, sobre o conceito de indústria 4.0 e sua aplicação nas empresas entre os entrevistados P1 e P2, cujo foco é para a empresa em que atuam. De acordo com P1, a I4.0 através da IoT permitiria a implementação de um sistema de acionamento remoto e automatizado de maquinário, reduzindo custos com mão de obra, energia elétrica e consumo de água. Sistemas de acompanhamento em tempo real do processo produtivo também poderiam ser implementados com a finalidade de otimizar tempo e aumentar a produtividade. O big data também pode ser implementado visando a um maior processamento de dados, com o intuito de receber informações precisas e aumentar a assertividade no processo como um todo. A automação de processos manuais através de equipamentos autônomos, como o envase de produtos, também poderia reduzir gargalos de tempo e aumentar a precisão dos processos.

Já para o entrevistado P2, a resposta foi diferente, tendo comentado que nenhuma tecnologia da I4.0 faria diferença no processo, pois a operação funciona e está dando resultados satisfatórios. Já os entrevistados P3 e P4, especialistas do setor, comentaram que, no setor químico em geral, as tecnologias da I4.0 são muito úteis e que, com certeza, transformariam a operação das indústrias, citando exemplos como a big data e o grande volume de processamento de dados, para melhorar a informação e a tomada de decisão, a automação de processos via robótica e robôs autônomos, visando a manter padrões, reduzir desperdícios e evitar acidentes com pessoas, otimizar espaço e logística interna e externa.

As oportunidades das tecnologias da indústria 4.0, através do aprendizado de máquina, da IoT e big data são alternativas para produzir mais com menos pessoas, além de oferecer mais segurança e reduzir os riscos do negócio, bem como aumentar a produtividade, reduzir gargalos e proporcionar maior integração das etapas produtivas. A tomada de decisão simplificada, a assertividade facilitada pelas tecnologias da I4.0, a interação entre computadores e máquinas e o menor número possível de interferência humana são outros aspectos que podem ser implementados e melhorados pela utilização das tecnologias (Ghobakhloo, 2020; Jabbour et al., 2018; Kamble,

Gunasekaran, & Dhoni, 2019; Moeuf et al., 2017; Wang & Shen, 2016; Xu, Xu, & Li, 2018).

Existem também as questões de sustentabilidade e controle ambiental, que podem ser melhoradas e beneficiadas pelas empresas a partir da adoção das tecnologias da I4.0, tendo muitas empresas incluindo questões sustentáveis como um objetivo fundamental na estratégia operacional. A sustentabilidade 4.0, termo designado ao importante papel da tecnologia para atingir metas de sustentabilidade, envolve o uso de tecnologias como a IoT e a IA para melhorar o desempenho ambiental e impulsionar a inovação nas empresas. Portanto, quando o entrevistado cita a IoT como uma solução para acionamento de máquinas e válvulas remotamente, os benefícios envolvem a economia de energia elétrica, redução da emissão de gases, economia de água de resfriamento de maquinário e também redução de riscos à saúde humana, portanto, têm-se uma tecnologia sendo utilizada para fins ambientais e sustentáveis (Chen et al., 2020; Di Carlo et al., 2021; Sołtysik-Piorunkiewicz & Zdonek, 2021; Upadhyay et al., 2021).

Na próxima pergunta foi questionado sobre as tecnologias que foram adotadas pelas empresas, nos últimos cinco anos, visando à redução do impacto ambiental. As respostas encontram-se na Figura 4, na sequência.

Figura 4
Tecnologias adotadas

Entrevistado	Tecnologias adotadas que resultaram na redução do impacto ambiental
P1	Armazenamento de dados em nuvem, lâmpadas de LED e sensores.
P2	Lâmpadas de LED e placas de energia solar.
P3	Poder-se-ia buscar alternativas mais acessíveis, desenvolver tecnologias de "entrada" e pensar em pequenas soluções para problemas compatíveis com os tamanhos das empresas.
P4	Tecnologias relacionadas com a questão energética e energias limpas, energia verde. Baterias de lítio, placas solares e processos de transformação de resíduo em energia.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Como tecnologias adotadas pelas empresas dos entrevistados P1 e P2, visando a reduzir os impactos ambientais, foram providenciadas iniciativas acessíveis financeiramente, como a



substituição para lâmpadas de LED, implementação de sensores de acionamento de lâmpadas por presença, instalação de placas de energia solar e a implementação do armazenamento em nuvem para reduzir o uso de caixas e papel. Para o entrevistado P3, pensando no setor químico em geral, poder-se-ia buscar alternativas mais acessíveis e desenvolver alguma tecnologia de baixo custo, pensando em soluções para os problemas compatíveis com os tamanhos das empresas. Na visão de P4, as grandes evoluções tecnológicas estão sendo direcionadas à questão energética e de energias verdes, como a implementação de baterias de lítio, placas de energia solar e desenvolvimento de processos produtivos de transformação de resíduos em energia.

Conforme as respostas dos entrevistados P3 e P4, destacando a importância de melhorias no fluxo de processos e integração da fábrica, o processo rumo à sustentabilidade começa pela implementação das ferramentas da I4.0, com a adoção de dimensões inteligentes, promoção de cultura empresarial eficiente e sustentável. A integração aborda questões como a relação entre máquinas e humanos e a gestão do tempo, refletindo os resultados em economia, segurança, saúde dos trabalhadores e preservação do meio ambiente (Ingaldi & Ulewicz, 2019; Ivanov, 2018; Javaid et al., 2022; Machado, Winroth, & Silva, 2020; Oláh et al., 2020; Villar et al., 2020).

O controle de consumo de água por meio de medições e manutenções preventivas por sensores é um exemplo da implementação da I4.0, visando a um ambiente sustentável. A redução do consumo de energia, com a IoT sendo utilizada para programações de máquina, também é um exemplo. A utilização de big data para melhorar a eficiência das informações e do processamento de dados, permitindo tomadas de decisões mais assertivas, antecipando necessidades e otimizando processos, é outro exemplo de melhoria ambiental proporcionada pela I4.0. A reciclagem de resíduos e reutilização de matérias-primas através da reciclagem e remanufatura, relacionadas às análises por robôs autônomos, por exemplo, são citados pelos entrevistados e também relacionam-se com os conceitos da I4.0 para a sustentabilidade (Chen et al., 2021; Di Carlo et al., 2021; Ivanov, 2018; Javaid et al., 2022; Oláh et al., 2020; Sołtysik-Piorunkiewicz & Zdonek, 2021;

Upadhyay et al., 2021; Villar et al., 2020).

Além disso, decorrente da observação sistemática participante e levantamento documental, a partir de análise de registros internos das organizações, foi possível constatar, a título de exemplo prático, que dentre as tecnologias adotadas, para promover práticas sustentáveis, destaca-se a instalação de sensores, conectados à internet, para o controle automatizado de água, energia elétrica, bem como de estoques de insumos e de resíduos gerados. A referida predição se deve, tanto pela relevância do impacto ambiental, como pela redução do valor do investimento necessário para a sua implementação. Essas preferências, na utilização de tecnologias para a promoção de práticas sustentáveis, em organizações de diferentes setores econômicos, já foram notadas e mencionadas em outros estudos, como de Villar et al. (2020), Sołtysik-Piorunkiewicz & Zdonek (2021) e Javaid et al. (2022).

A última pergunta foi sobre quais ações poderiam ser adotadas pelas empresas e pelo setor químico em geral, para reduzir o impacto ambiental, com o apoio de novas tecnologias. Na sequência, a Figura 5 ilustra a resposta de cada um dos entrevistados.

Figura 5

Ações futuras para redução de impacto ambiental

Entrevistado	Quais ações, na sua opinião, poderiam ser adotadas pela empresa, para reduzir o impacto ambiental de suas atividades, com apoio de novas tecnologias?
P1	<ul style="list-style-type: none"> *Implementação de dispositivos para acionamento remoto de máquinas; *Utilização da tecnologia de big data para analisar dados com mais velocidade e tomar decisões mais ágeis no processo de formulação e desenvolvimento de produtos; *Automatização dos processos finais de produção, como o envase, por exemplo, a partir da robotização ou automação de equipamentos; *Aumento da capacidade de armazenagem em nuvem para aumentar os arquivos digitais e diminuir papéis e caixas.
P2	<ul style="list-style-type: none"> *Robotização e processos autônomos seria interessante, visando ganhar velocidade nos processos e assertividade; *Sistemas de maior processamento de dados e informações mais rápidas; *Sistemas de formulações mais avançados; *Integração de sistemas e maquinários.
P3	<ul style="list-style-type: none"> *Investir em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, menos agressivos ao meio ambiente e de fontes renováveis e biodegradáveis.
P4	<ul style="list-style-type: none"> *Principalmente, a conscientização dos altos níveis de comando das empresas sobre meio ambiente, sustentabilidade e práticas mais verdes.

Fonte: Dados da pesquisa (2024).



Percebe-se, pelas respostas dos entrevistados, a preocupação em otimização de processos e gestão de recursos, além de proporcionar melhores condições para a equipe. A indústria química pode, a partir das tecnologias da I4.0, aprimorar a operação por meio da digitalização, trazendo esses benefícios apresentados. A digitalização no processo produtivo viabiliza a adoção de três estratégias principais, sendo elas a digitalização dos processos existentes, a implementação de um modelo operacional centrado em dados, e a integração de um modelo de negócio digital. Essas estratégias podem proporcionar rentabilidades entre 5% e 20%, dependendo da empresa, superando as barreiras financeiras conforme identificado na resposta do entrevistado E2, que rechaça a dificuldade de implementação devido aos altos custos (Jabbour et al., 2018; Gawel & Herweijer, 2020; Ghobakhloo, 2020; Shevtsova, Shvets, & Kasatkina, 2020).

Além disso, a implementação das tecnologias da I4.0, com viés sustentável, apoia-se em três pilares, sendo o ambiental, mantendo o equilíbrio no consumo e repondo recursos; o econômico, com o crescimento econômico no longo prazo; e o social, com a gestão dos impactos sobre as pessoas (Beier et al., 2020; Ghobakhloo, 2020; Kamble, Gunasekaran, & Dhone, 2019; Moeuf et al., 2017).

A transição para a I4.0 impulsiona a sustentabilidade nas indústrias. No entanto, faz-se necessário um nível maior de maturidade por parte da equipe e da cultura empresarial, o qual pode ser alcançado por meio do desenvolvimento de recursos humanos e capacitações para lidar com as demandas que podem surgir com a digitalização. A transição e implementação dos conceitos de conectividade exigem não apenas mudanças tecnológicas, mas culturais e institucionais também, devendo as gestões estabelecerem prioridades de atuação, preparar-se para os desafios e complexidades e pensar em parcerias e colaborações que auxiliem na transição (Jabbour et al., 2018; Ghobakhloo, 2020; Wang & Shen, 2016; Xu, Xu, & Li, 2018). Tais afirmações relacionam-se com a resposta do entrevistado P4, que indica a necessidade de uma mudança de nível hierárquico no setor químico, devendo acontecer de cima para baixo, ou seja, sendo impulsionada e organizada pelos níveis mais altos de comando.

Por fim, destaca-se a necessidade de pesquisa em desenvolvimento, envolvendo desde a captação de novos fornecedores e matérias-primas mais inovadoras e sustentáveis, até processos internos e ferramentas de gestão. A crescente pressão por práticas mais sustentáveis vem transformando a maneira como as empresas enxergam seus processos, buscando cada vez mais alternativas para tornar o negócio mais verde. A mudança de cultura, valores e pensamento macro da empresa deve ser fundamental para que a transição para uma manufatura mais verde seja possível, e ocorra de uma maneira natural, sem grandes impactos operacionais (Jabbour et al., 2018; Gawel & Herweijer, 2020; Ghobakhloo, 2020; Shevtsova, Shvets, & Kasatkina, 2020).

CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi analisar a adoção das tecnologias da indústria 4.0 para promover práticas sustentáveis, nos últimos cinco anos, em uma indústria química fabricante de adesivos. O estudo justifica-se pela contribuição aos temas de indústria 4.0 e sustentabilidade organizacional, especialmente no setor químico e em indústrias de pequeno porte. Portanto, além de beneficiar a própria empresa analisada, com base nos dados evidenciados e nas análises das possíveis tecnologias, que poderiam ser utilizadas na operação da empresa, visando a mitigar os impactos ambientais, o estudo também se justifica para outras empresas de porte semelhante da região, podendo a metodologia servir de modelo a ser seguida.

Para que o objetivo fosse alcançado, além da opção de estratégia de estudo de caso único, foi utilizada uma abordagem qualitativa, coleta de dados por meio de entrevista em profundidade com o químico responsável e com três especialistas externos e que não atuam na empresa, análise documental de arquivos e registros recebidos pela empresa e observação sistemática participante, considerando que um dos autores deste estudo é colaborador. Os dados foram submetidos à análise de conteúdo.

De acordo com as análises, foram identificadas as tecnologias da indústria 4.0 utilizadas na operação atual, concluindo que a empresa já



utilizava certas tecnologias mesmo sem saber que pertenciam ao grupo, e os motivos das implementações visavam tanto à redução de custos quanto à mitigação dos impactos ambientais da operação. Além disso, apesar do cenário de limitação de recursos evidenciado, e que corrobora com a visão dos especialistas de que o setor químico sofre com o alto valor das tecnologias, a empresa buscou alternativas acessíveis e que se enquadrassem na realidade atual, demonstrando o interesse por parte dos gestores em acompanhar e atender questões que tangem ao meio ambiente. Por fim, sugestões de novas tecnologias e melhorias foram destacadas pelos entrevistados, visando à possibilidade de implementação no futuro tanto na empresa quanto para o setor químico em geral.

Como os resultados originam-se de um estudo de caso único, o que restringe a sua generalização, sugere-se que sejam realizadas novas pesquisas sobre o tema, em empresas de realidade semelhante na região, adotando tanto uma abordagem qualitativa quanto quantitativa, com o intuito de relacionar o teor das respostas com a teoria e identificar possíveis semelhanças em operações industriais de empresas de porte e atividade similares à empresa estudada. Nessa perspectiva, recomenda-se que tais pesquisas analisem não apenas os impactos ambientais e econômicos, mas também o papel da cultura organizacional e das políticas regionais no avanço da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira da Indústria Química. O desempenho da indústria química brasileira. São Paulo: Abiquim, 2022. 21 p. https://docs.google.com/viewer?url=https://abiquim-files.s3.us-west-2.amazonaws.com/uploads/guias_estudos/o_desempenho_da_industria_quimica_bra_2022.pdf&embedded=true.

Bardin, L. (2011). *Análise de conteúdo*. São Paulo: Almedina. ISBN 978-8562938047.

Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes—A literature review. *Journal of cleaner production*, 259, 120856. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>.

doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856.

Chen, Y., Han, Z., Cao, K., Zheng, X., & Xu, X. (2020). Manufacturing upgrading in industry 4.0 era. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 766-771. <https://doi.org/10.1002/sres.2717>.

Di Carlo, F., Mazzuto, G., Bevilacqua, M., & Ciarpica, F. E. (2021). Retrofitting a process plant in an industry 4.0 perspective for improving safety and maintenance performance. *Sustainability*, 13(2), 646. <https://doi.org/10.3390/su13020646>.

Falkenroth-Naidu, K., Hong, S., Littmann, A., Sellschop, R., & Seitz, A. (2023). A new operations formula for the chemicals sector. McKinsey Global Publishing. <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/a-new-operations-formula-for-the-chemicals-sector#/>.

Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2018). A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. *Production Planning & Control*, 29(8), 633-644. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960>.

Galembeck, F. (2017). Evolução e inovação no setor químico brasileiro: uma visão dos últimos quarenta anos. *Química Nova*, 40(6), 630-633. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170069>.

Gawel, A.; Herweijer, C. (2020). *Unlocking technology for the Global Goals*. Geneva: World Economic Forum, PwC, 48. https://www3.weforum.org/docs/Unlocking_Technology_for_the_Global_Goals.pdf.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of cleaner production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>.

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

Hayes, R. (2006). Operations, strategy, and technology: pursuing the competitive edge. *Strategic Direction*, 22(7).

Ingaldi, M., & Ulewicz, R. (2019). Problems with the Implementation of Industry 4.0 in Enterprises from the SME Sector. *Sustainability*, 12(1), 217. <https://doi.org/10.3390/su12010217>.

Inovação é fator chave para indústria química. *Sebrae*, [s. l.], 14 fev. 2023. <https://sebrae.com.br/sites/Portal->



Sebrae/artigos/inovacao-e-fator-chave-para-a-industria-quimica,b14a102229056810VgnVCM-1000001b00320aRCRD.

Ivanov, D. (2018). New drivers for supply chain structural dynamics and resilience: Sustainability, industry 4.0, self-adaptation. *Structural Dynamics and Resilience in Supply Chain Risk Management*, 293-313. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7_10.

Jabbour, A. B. L. S., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270, 273-286. <http://link.springer.com/10.1007/s10479-018-2772-8>.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.008>.

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International journal of production research*, 58(5), 1319-1337. <https://pure.psu.edu/en/publications/industry-40-and-lean-manufacturing-practices-for-sustainable-orga>.

Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462-1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>.

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

Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International journal of production research*, 56(3), 1118-1136. <http://hdl.handle.net/10.1080/00207543.2017.1372647>.

Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability*, 12(11), 4674. <https://doi.org/10.3390/su13020917>.

su12114674.

Oliveira, F. R., França, S. L. B., & Rangel, L. A. D. (2018). Challenges and opportunities in a circular economy for a local productive arrangement of furniture in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.031>.

Prodanov, C. C., & De Freitas, E. C. (2013). *Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição*. Editora Feevale. <http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/Ebook%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>.

Schreiber, D. (2022). Análise reflexiva acerca das alternativas de redução de custos ambientais por meio da adoção das tecnologias da indústria 4.0 mediadas pelas ferramentas Design Thinking e Cooper's Stage Gate. *Organizações em contexto*, 18 (36), 253-275. <https://www.metodista.br/revistas/revistas-ims/index.php/OC/issue/view/619>.

Shevtsova, H., Shvets, N., & Kasatkina, M. (2020, October). How leading global chemical companies contribute to industry 4.0. In *2020 61st International Scientific Conference on Information Technology and Management Science of Riga Technical University (ITMS)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITMS51158.2020.9259317>.

Silva, D. A. L., Silva, E. J. D., & Ometto, A. R. (2016). Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. *Production*, 26, 642-655. <https://www.scielo.br/j/prod/a/8TLK8wqbCJwP6fNgpcHfYCYQ/?format=pdf&lang=pt>.

Sołtysik-Piorunkiewicz, A., & Zdonek, I. (2021). How society 5.0 and industry 4.0 ideas shape the open data performance expectancy. *Sustainability*, 13(2), 917. <https://doi.org/10.3390/su13020917>.

Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V., & Kazancoglu, Y. (2021). Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal of cleaner production*, 293, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>.

Villar, L M-D., Oliva-Lopez, E., Luis-Pineda, O., Benešová, A., Tupa, J., & Garza-Reyes, J. A. (2020).



Fostering economic growth, social inclusion & sustainability in Industry 4.0: a systemic approach. *Procedia Manufacturing*, 51, 1755-1762. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.244>.

Wang, Y., & Shen, N. (2016). Environmental regulation and environmental productivity: The case of China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 758-766. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301587>.

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>.