

TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E SEUS IMPACTOS NA OPERAÇÃO SUSTENTÁVEL DAS EMPRESAS

INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES AND THEIR IMPACTS ON
THE SUSTAINABLE OPERATION OF COMPANIES

GUSTAVO DE OLIVEIRA HANAUER
gustavo.hanauer@icloud.com
Universidade Feevale
<https://orcid.org/0000-0001-6366-6342>

DUSAN SCHREIBER
dusan@feevale.br
Universidade Feevale
<https://orcid.org/0000-0003-4258-4780>

LUCIANE PEREIRA VIANA
viana.luciane.lu@gmail.com
Universidade Feevale
<https://orcid.org/0000-0002-9577-728X>

RESUMO

Objetivo: Analisar o possível impacto das tecnologias da indústria 4.0 na operação de uma indústria química fabricante de adesivos, pela perspectiva de redução do impacto ambiental.

Proposta: Propor insights para gestores de outras organizações interessados em adotar tecnologias da Indústria 4.0, auxiliando na análise e planejamento para elaboração de procedimentos operacionais alinhados à sustentabilidade empresarial.

Abordagem teórica: A pesquisa baseia-se na interseção entre os conceitos de sustentabilidade empresarial e tecnologias da Indústria 4.0.

Provocação: O estudo aborda como pequenas indústrias com restrições financeiras podem usar tecnologias da Indústria 4.0 para unir inovação e redução do impacto ambiental, dialogando com gestores e pesquisadores.

Métodos: Abordagem qualitativa, de estudo de caso único aplicado a uma pequena indústria química. A coleta de dados incluiu entrevistas em profundidade com um colaborador envolvido em decisões estratégicas e três especialistas do setor que não atuam na empresa; levantamento documental e; observação participante. Os dados foram analisados por meio de análise de conteúdo.

Resultados: Identificou-se que a empresa utiliza tecnologias da Indústria 4.0, como *Big Data* e IoT, sem saber que pertenciam ao grupo. As limitações financeiras e o tamanho da empresa restringem a capacidade de investir em novas tecnologias.

Conclusões: O estudo mostra que pequenas indústrias com recursos limitados podem adotar tecnologias da Indústria 4.0 para reduzir o impacto ambiental, priorizando soluções acessíveis, e contribui para o planejamento estratégico em cenários desafiadores.

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

ABSTRACT

Objective: *To analyze the possible impact of Industry 4.0 technologies on the operation of a chemical industry that manufactures adhesives, from the perspective of reducing environmental impact.*

Proposal: *To provide insights for managers of other specific organizations in adopting Industry 4.0 technologies, assisting in the analysis and planning for the development of operational procedures aligned with corporate sustainability.*

Theoretical approach: *The research is based on the intersection between the concepts of corporate sustainability and Industry 4.0 technologies.*

Provocation: *The study addresses how small industries with financial constraints can use Industry 4.0 technologies to combine innovation and reduction of environmental impact, dialoguing with managers and researchers.*

Methods: *Qualitative approach, of a single case study applied to a small chemical industry. Data collection included in-depth interviews with a company employee involved in strategic decisions and three industry experts who do not work in the company; documentary survey; and participant observation. The data were analyzed through content analysis.*

Results: *It was identified that the company uses Industry 4.0 technologies, such as Big Data and IoT, without knowing that they belonged to the group. Financial limitations and the size of the company restrict the ability to invest in new technologies.*

Conclusions: *The study shows that small industries with limited resources can adopt Industry 4.0 technologies to reduce environmental impact, prioritizing easy solutions and contributing to strategic planning in challenges.*

Keywords: *Industry 4.0. Chemical Industry. Technologies.*

1 INTRODUÇÃO

O setor químico é considerado muito importante para a economia global, pois fornece produtos e serviços para as mais diversas áreas e indústrias. De acordo com Falkenroth-Naidu et al. (2023), através da McKinsey consultoria, a indústria química global cresceu 25% em 2021 impulsionada pela demanda de setores como automotivo e construção. O Brasil ocupa atualmente o sexto lugar em receita no setor, com faturamento de aproximadamente 187 bilhões de dólares em 2022, sendo 88 bilhões referentes a produtos químicos industriais, que cresceram 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) reforça a importância de observar tendências internacionais para melhorar o cenário no Brasil. Ao adotar tecnologias da indústria 4.0, as empresas podem alinhar produção e sustentabilidade, como apontam Silva, Silva e Ometto

(2016), que destacam a importância da manufatura sustentável, voltada para redução de impactos ambientais e o uso eficiente de recursos naturais nas operações das empresas.

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 favorecem a sustentabilidade, tanto no desenvolvimento de produtos quanto em processos operacionais mais ecológicos, facilitando a transformação das operações empresariais (Hayes et al., 2004; Schreiber, 2022). Diante deste contexto, a indústria 4.0 abrange tecnologias digitais que transformam as operações das empresas, exigindo preparação e estudo para uma implementação eficaz (Schreiber, 2022).

A partir disso, este estudo foi realizado em uma indústria química, a qual, por motivos de preservação de identidade, é identificada pelo codinome Empresa Y. 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 tem como objetivo analisar o possível impacto das tecnologias da indústria 4.0 na operação de uma indústria química fabricante de adesivos, pela perspectiva de redução do impacto ambiental. Em um primeiro momento, foram analisadas quais tecnologias da indústria 4.0 foram adotadas visando 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, visando apresentar ações que possam contribuir para a implementação de novas tecnologias e de práticas mais sustentáveis.

Em relação à estrutura deste estudo, ele está dividido nos seguintes tópicos: (2) referencial teórico, no qual descreve-se as tecnologias da indústria 4.0 e seus impactos na operação das empresas, apresentando os conceitos e definições fundamentais tanto para o planejamento da pesquisa quanto para a criação dos instrumentos utilizados na coleta e na análise de dados; (3) metodologia, apresentando os instrumentos e técnicas metodológicas utilizadas para coletar e analisar os dados; (4) análise dos resultados e discussões, abordando e discutindo os resultados encontrados, relacionando-os com os conceitos apresentados na fundamentação teórica e, por fim, as referências utilizadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Diante do contexto de inovação e de busca por novas tecnologias, impulsionado pelo avanço científico e tecnológico que vem ocorrendo nas últimas décadas, as empresas estão cada vez mais necessitadas de alternativas que possam otimizar a sua operação e tornar a sua manufatura mais eficiente e economicamente viável. Para Roblek, Mesko e Krapez (2016), é possível representar a tecnologia em três categorias: (i) na categoria física, como máquinas e equipamentos; (ii) na categoria humana, pelas habilidades e experiências dos colaboradores e (iii) na categoria organizacional, pelos sistemas de produção e procedimentos de qualidade.

O conceito de indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, surgiu em 2011 na Alemanha, como uma forma de transformar a gestão empresarial por meio de tecnologias digitais inovadoras (Schreiber, 2022). Originada do programa de alta tecnologia do governo alemão, a ideia de “fábricas inteligentes” rapidamente se difundiu globalmente, sendo

amplamente adotada por organizações industriais e se tornando tema comum em estudos e pesquisas (Roblek, Mesko & Krapez, 2016; Yao et al., 2017).

De acordo com Yao et al. (2017), as três revoluções industriais anteriores buscavam promover ou enfatizar a produção em larga escala, ao passo que a indústria 4.0 se direciona para a personalização em massa. Dessa forma, a I4.0 transformou a revolução anterior por meio da introdução de tecnologias de produção inteligentes e da integração com a inteligência social (o ser humano), como a computação, a inteligência coletiva e a inovação.

Schreiber (2022) conceitua que a indústria 4.0 prioriza, dentro do ambiente operacional das empresas, seja para estudo ou para aplicação das tecnologias, as áreas de comunicação máquina-máquina e integração e automação de sistemas de manufatura, as quais fundamentam-se na inteligência artificial e processamento de dados em nuvem, para que a orientação do fluxo operacional seja de forma autônoma.

Adotar o conceito de indústria 4.0 pode ser desafiador para algumas empresas devido a obstáculos e fatores limitantes. A resistência dos gestores geralmente está ligada ao alto custo das tecnologias e ao impacto financeiro, já que essas implementações exigem grandes investimentos. Mesmo como o aumento de alternativas disponíveis, a preocupação com os altos custos e a complexidade das operações continua a ser um fator relevante para os gestores (Durairaj et al., 2002; Jasch, 2006).

Diante desse contexto, a transformação promovida pela indústria 4.0 aumenta a conectividade entre empresas manufatureiras. Para isso, a gestão inteligente deve focar na otimização da cadeia de suprimentos, eficiência produtiva e estratégias empresariais inteligentes. Além disso, as empresas podem se conectar com fornecedores, parceiros e clientes, permitindo uma coleta mais detalhada de informações, análise de dados e maior compreensão do mercado, com o objetivo de melhorar a resposta da cadeia de suprimentos e reduzir custos operacionais (Chen et al., 2020; Xu, Xu & Li, 2018).

Para otimizar o gerenciamento de fábricas e automatizar a produção, é necessário padronizar processos, aumentar a eficiência e melhorar o suporte decisório (Chen et al., 2020). No entanto, tecnologias da indústria 4.0, como a IoT ou os Sistemas de Produção Ciber-Físicos (CPPS), não são soluções prontas para uso imediato (Ghobakhloo & Ching, 2019). Essas tecnologias exigem a integração de inteligência artificial (IA), comunicação entre máquinas, sensores inteligentes, computação em nuvem e *big data*, formando um sistema dinâmico que garante eficiência e confiabilidade nas operações industriais (Chen et al., 2020; Sisinni et al., 2018).

Conforme Ghobakhloo (2020), são diversos os impactos da indústria 4.0 nas empresas, citando, por exemplo: Inovação do modelo de negócio; Redução das emissões de carbono e gases nocivos; Melhoria da rentabilidade empresarial; a otimização do fluxo de materiais; o melhor tempo de lançamento dos produtos no mercado; espaço de fabricação e otimização das instalações; eficiência de recursos; redução de desperdício; inovação e qualidade superior de produtos; maior capacidade de produção e confiabilidade; adaptabilidade estratégica e redução de custos de estoque.

Os impactos da I4.0 nas empresas e a forma com que essas tecnologias podem contribuir para o desenvolvimento econômico, social sustentável e ambiental vem ganhando cada vez mais atenção (Ghobakhloo, 2020). Muitas indústrias, especialmente aquelas que operam em mercados altamente competitivos, estão adotando a transformação digital com base em tec-

nologias e sistemas inteligentes (I4.0). Além disso, várias empresas estão comprometidas com a sustentabilidade devido aos seus benefícios na gestão da cadeia de suprimentos, tais como o aumento da eficiência, a redução de riscos, a vantagem competitiva global, um maior valor futuro da empresa e até melhores desempenhos econômicos (Garrido; Muniz Jr; Ribeiro, 2024).

Javaid et al. (2022) complementam que as vantagens da indústria 4.0 incluem maior competitividade e desempenho, maior versatilidade e resiliência, além de aumento da lucratividade. A indústria 4.0 também facilita e impulsiona o atendimento ao consumidor, além de permitir ao fabricante alcançar produtos melhores e mais eficientes. De uma maneira geral, a I4.0 consegue gerar mais e mais rápido, ao mesmo tempo em que torna o capital mais rentável e confiável (Jamwal et al., 2021; Javaid et al., 2022; Müller, Kiel & Voigt, 2018).

É essencial estabelecer uma estratégia que viabilize a adoção eficaz da indústria 4.0 pelas empresas (Javaid et al., 2022). A constante renovação e atualização são fundamentais, uma vez que o avanço tecnológico e a automação podem resultar na substituição de trabalhadores por novas funções. A implementação da I4.0, portanto, pode variar significativamente entre diferentes mercados e regiões, destacando a necessidade de uma política industrial abrangente e adaptável para integrá-los à nova era digital. Isso requer a aquisição de conhecimentos especializados, centrados na flexibilidade aumentada e na utilização de dados e monitoramento de processos em tempo real (Beier et al., 2020; Ivanov, 2018).

3 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 Y, localizada no Rio Grande do Sul.

Usando como critério o tempo de atuação e a participação em decisões estratégicas, bem como possuir formação acadêmica superior, 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 Y1.

Além do químico (Y1), outras três pessoas externas à empresa foram entrevistadas, ou seja, sem vínculo e que não são colaboradores. Estes entrevistados estão identificados pelas siglas Y2, Y3, Y4. O entrevistado Y2 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 Y, e cujo objetivo da entrevista foi obter informações sobre outra indústria química de porte e atividade muito próximas, visando relacionar com as respostas do entrevistado Y1, 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 Y3. O terceiro é professor de ensino superior de curso de Engenharia Química, da Universidade Feevale,

de Novo Hamburgo-RS, atuante no setor químico há mais de 20 anos, sendo identificado pela sigla Y4. Com os entrevistados Y3 e Y4, 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. O quadro 1 sintetiza as informações dos entrevistados.

Quadro 1 - Perfil de Entrevistados

Entrevistados	Empresa y	Formação e atuação	Experiência
Y1	É colaborador	Químico Industrial e responsável técnico da Empresa Y	10 anos
Y2	Não é colaborador	Químico industrial e proprietário de indústria química de porte semelhante à empresa estudada	Aprox. 25 anos
Y3	Não é colaborador	Especialista, químico industrial, consultor na área e professor de ensino superior	Aprox. 40 anos
Y4	Não é colaborador	Especialista, engenheiro químico, consultor na área e professor de ensino superior	Aprox. 20 anos

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

Para a aplicação das entrevistas, elaborou-se um roteiro de perguntas com base nos conceitos apresentados na revisão teórica. 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 04 de abril de 2024 realizou-se a primeira entrevista, com Y2, presencialmente na empresa na qual é colaborador, com duração de, aproximadamente, 40 minutos. No dia 05 de abril de 2024 realizou-se a entrevista com Y3, virtualmente, utilizando a plataforma de reuniões digitais do *Google Meet*, com duração de, aproximadamente, 30 minutos. Por fim, no dia 08 de abril de 2024, foram realizadas as entrevistas com Y1, presencialmente na empresa estudada, com duração de aproximadamente 30 minutos e com Y4, 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, e demais documentos administrativos. Para a observação sistemática participante, a execução desta etapa foi realizada pelo autor deste estudo, o qual é colaborador da empresa estudada e possui acesso a informações, dependências da empresa e contato com colaboradores. 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 e *checklist* para levantamento documental e observação sistemática e com a estruturação das ideias principais; etapa de análise, com a organização dos quadros, tabelas e sintetização das respostas obtidas e, a definição das categorias, as quais são: (i) mapeamento das tecnologias utilizadas na operação; (iii) possibilidade de implementação de novas tecnologias no processo operacional e; (ii) os possíveis impactos da implementação de novas tecnologias na operação. Por fim, a etapa de tratamento de dados, com a delimitação dos resultados, interpretações e sugestões de melhorias.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

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. Para o melhor entendimento e avaliação por parte dos entrevistados Y1 e Y2, foi necessário introduzir brevemente alguns conceitos sobre o que são as tecnologias da indústria 4.0, as aplicações e exemplos práticos. O quadro 2 ilustra as respostas.

Quadro 2 - Tecnologias da I4.0 utilizadas

Entrevistado	Descrição das tecnologias utilizadas	Tecnologias da I4.0 à que se referem
Y1	Armazenamento de dados em nuvem, sistema de monitoramento de alarme e câmeras com acesso via celular, ligar e desligar lâmpadas remotamente, site online 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
Y2	Sistema ERP, placas de energia solar, sistema de monitoramento de alarme e câmeras com acesso via celular, sensores de máquinas.	IoT
Y3	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
Y4	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)

É possível representar a tecnologia em três categorias, sendo elas na categoria física, como máquinas e equipamentos; na categoria humana, por habilidades e experiências e; a 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 (Ghobakhloo, 2020; Roblek, Mesko & Krapez, 2016; Schreiber, 2022; Yao et al., 2017;).

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 no Quadro 3.

Quadro 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?
Y1	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;
Y2	O entrevistado entende que não seria beneficiado com a implementação de alguma das tecnologias apresentadas;
Y3	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.
Y4	Principalmente processos manuais que hoje utilizam operadores humanos, etapas de logística, transporte e carregamento de matérias-primas, organização interna de <i>layout</i> produtivo, otimização de espaço e agilidade em acionamentos e tomadas de decisão.

Fonte: Dados da pesquisa (2024)

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 (Durairaj et al., 2002; Garrido, Muniz Jr & Ribeiro, 2024; Ghobakhloo, 2020; Jasch, 2006; 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 (Chen et al., 2020; Ghobakhloo & Ching, 2019; Sisinni et al., 2018; Xu, Xu & Li, 2018).

Na próxima pergunta foi questionado sobre as tecnologias que foram adotadas pelas empresas, nos últimos cinco anos. As respostas encontram-se no Quadro 4, na sequência.

Quadro 4 - Tecnologias adotadas

Entrevistado	Tecnologias adotadas que resultaram na redução do impacto ambiental
Y1	Armazenamento de dados em nuvem, lâmpadas de LED e sensores.
Y2	Lâmpadas de LED e placas de energia solar.
Y3	Poder-se-ia buscar alternativas mais acessíveis, desenvolver tecnologias de "entrada" e pensar em pequenas soluções para problemas compatíveis com os tamanhos das empresas.
Y4	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)

Conforme as respostas dos entrevistados Y3 e Y4, 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 (Beier et al., 2020; Ivanov, 2018; Jamwal et al., 2021; Javaid et al., 2022; Müller, Kiel & Voigt, 2018)

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, o Quadro 5 ilustra a resposta de cada um dos entrevistados.

Quadro 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?
Y1	<ul style="list-style-type: none"> *Implementação de dispositivos para acionamento remoto de máquinas; *Utilização da tecnologia de <i>big data</i> 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 e;
Y2	<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 e; *Integração de sistemas e maquinários.

Entrevistado	Quais ações, na sua opinião, poderiam ser adotadas pela empresa, para reduzir o impacto ambiental de suas atividades, com apoio de novas tecnologias?
Y3	*Investir em pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, menos agressivos ao meio ambiente e de fontes renováveis e biodegradáveis e;
Y4	*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 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 Y2, que rechaça a dificuldade de implementação devido aos altos custos (Beier et al., 2020; Ghobakhloo, 2020; Ivanov, 2018; Javaid et al., 2022).

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; Schreiber, 2022). Portanto, 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 (Ghobakhloo, 2020; Xu, Xu & Li, 2018). Tais afirmações relacionam-se com a resposta do entrevistado Y4, 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.

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 (Durairaj et al., 2002; Garrido, Muniz Jr & Ribeiro, 2024; Ghobakhloo, 2020; Jasch, 2006).

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi analisar o possível impacto das tecnologias da indústria 4.0 na operação de uma indústria química fabricante de adesivos, pela perspectiva de redução do impacto ambiental. O estudo justifica-se por contribuir com a indústria 4.0 e a sustentabilidade, especialmente em pequenas empresas do setor químico. Além de beneficiar a empresa analisada, os resultados podem servir de modelo para outras empresas similares na região, bem como servir de inspiração para novos estudos no âmbito acadêmico. Para que o objetivo fosse alcançado, a metodologia utilizada incluiu um estudo de caso único, com entrevistas com o químico responsável e três especialistas externos do setor, que não atuam na empresa, além de

análise de documentos e observação sistemática participante, realizada pelo autor deste estudo, o qual é colaborador da empresa estudada. Os dados foram submetidos à análise de conteúdo.

Os dados analisados mostraram que a empresa já utilizava algumas tecnologias da indústria 4.0, mesmo sem saber, com o objetivo de reduzir custos operacionais e minimizar os impactos ambientais. Apesar das restrições financeiras enfrentada pela empresa, foi possível encontrar alternativas acessíveis e adaptadas à sua realidade, demonstrando o interesse dos gestores em abordar questões ambientais. Os entrevistados também sugeriram novas tecnologias para possível implementação futura, tanto na empresa quando no setor químico em geral.

Por se tratar de um estudo de caso único, que limita a generalização dos resultados, recomenda-se a realização de novas pesquisas em empresas de perfil semelhante na região, combinando abordagens qualitativas e quantitativas para identificar semelhanças e aplicar o entendimento sobre o uso dessas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (2022). O desempenho da indústria química brasileira. São Paulo: Abiquim, 21 p. Disponível em: 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. (1977). Análise de conteúdo. *Lisboa: edições*, 70, 225.
- 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>.
- 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>.
- Durairaj, S. K., Ong, S. K., Nee, A. Y., & Tan, R. B. (2002). Evaluation of life cycle cost analysis methodologies. *Corporate Environmental Strategy*, 9(1), 30-39. [https://doi.org/10.1016/S1066-7938\(01\)00141-5](https://doi.org/10.1016/S1066-7938(01)00141-5).
- Falkenroth-Naidu, K., Hong, S., Littmann, A., Sellschop, R., & Seitz, A. (2023). A new operations formula for the chemicals sector. *McKinsey Global Publishing*. Disponível em: https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/a-new-operations-formula-for-the-chemicals-sector#. Acesso em: 07 mai. 2024.
- 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>.
- Garrido, S., Muniz Jr, J., & Ribeiro, V. B. (2024). Operations management, sustainability & industry 5.0: A critical analysis and future agenda. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 100141. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100141>.
- 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>.
- Ghobakhloo, M., & Ching, N. T. (2019). Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. *Journal of Industrial Information Integration*, 16, 100107. <https://doi.org/10.1016/j.jiit.2019.100107>.
- Gil, A. C. (2008). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Editora Atlas SA.
- Hayes, R. (2006). Operations, strategy, and technology: pursuing the competitive edge. *Strategic Direction*, 22(7).
- 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.
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Kumar, V., & Kumar, S. (2021). Developing A sustainability framework for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 98, 430-435. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.129>.

- Jasch, C. (2006). How to perform an environmental management cost assessment in one day. *Journal of Cleaner Production*, 14(14), 1194-1213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.08.005>.
- 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>.
- Malhotra, N. K. (2019). *Pesquisa de Marketing-: uma orientação aplicada*. Bookman Editora.
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247. <https://doi.org/10.3390/su10010247>.
- 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. Disponível em: <http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/Ebook%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2024.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of industry 4.0. *Sage open*, 6(2), 2158244016653987.
- 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. Disponível em: <https://www.metodista.br/revistas/revistas-ims/index.php/OC/issue/view/619>. Acesso em: 08 mai. 2024.
- SEBRAE (2023). Inovação é fator chave para indústria química. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/inovacao-e-fator-chave-para-a-industria-quimica,b14a102229056810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 08 mai. 2024.
- Silva, D. A. L., Silva, E. J. D., & Ometto, A. R. (2015). Green manufacturing: uma análise da produção científica e de tendências para o futuro. *Production*, 26, 642-655. <https://www.scielo.br/j/prod/a/8TLK8wqbcJwP6fNgpcHfYCQ/?format=pdf&lang=pt>.
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics*, 14(11), 4724-4734. <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>.
- 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>.
- Yao, X., Zhou, J., Zhang, J., & Boër, C. R. (2017, September). From intelligent manufacturing to smart manufacturing for industry 4.0 driven by next generation artificial intelligence and further on. In *2017 5th international conference on enterprise systems (ES)* (pp. 311-318). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ES.2017.58>.