

INDÚSTRIA 4.0 - COMO OS DISPOSITIVOS CONECTADOS ESTÃO TRANSFORMANDO AS FÁBRICAS

HERBET RODRIGUES SILVA JÚNIOR

DOMINGOS ROBSON SILVA COSTA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

GIOVANI LIMA VERDE COELHO

SÉRGIO MURILO PETRI
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ERICK YANNES
UNICAMP UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

Introdução

Assim como os dispositivos móveis (smartphones e tablets) já são indispensáveis no cotidiano da humanidade, a inserção de tecnologias se torna cada vez mais crucial no contexto industrial, sobretudo quando se trata de automação. Nesse sentido, o termo “Indústria 4.0” foi cunhado como uma iniciativa do governo federal da Alemanha juntamente com universidades e empresas, no ano de 2011, para se referir a sistemas de manufatura de ponta (Adnan et al., 2023). Sendo assim, essa denominação refere-se ao uso das tecnologias que estão em evidência atualmente no ambiente das indústrias.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Dado esse cenário, é possível concluir que é uma questão de tempo até o uso de IoT ocupar a maioria das indústrias. Porém, a indústria é dividida em diversos setores, os quais costumam se desenvolver em ritmos diferentes. Sendo assim, faz-se importante investigar como a IoT vem impactando individualmente, a fim de verificar em quais ambientes essas tecnologias estão mais desenvolvidas e quais são menos estudadas nesse sentido. Desse modo, este trabalho tem como objetivo realizar essa investigação, a fim de identificar novas possibilidades de estudos e implementações na área.

Fundamentação Teórica

É importante destacar que a IoT é bastante versátil e está em constante evolução, com um frequente desenvolvimento de novos recursos. Posto isso, no estudo realizado por Sethi et al. (2020), são apresentadas diversas aplicações emergentes de Internet das Coisas na indústria, como a cibersegurança, análise de dados, integração com blockchain, além de apresentar o seu desenvolvimento ao longo do tempo.

Metodologia

A revisão bibliográfica foi conduzida em sete etapas: 1) definição da questão de pesquisa, 2) definição dos setores a serem buscados na literatura, 3) definição das strings de pesquisa e coleta dos artigos, 4) tratamento dos artigos, 5) apresentação dos resultados, 6) interpretação dos resultados e 7) apresentação da revisão e conclusões acerca do tema. Utilizou-se a estratégia TQO, onde: T (tema) = “indústria 4.0 e IoT”, Q (qualificador) = “implementação das novas tecnologias” e O (objeto) = “setores industriais”.

Análise e Discussão dos Resultados

Após a implementação das estratégias de pesquisa utilizadas, foram identificados um total de 513 artigos aptos para análise, sendo esses a soma dos trabalhos encontrados para cada setor e em cada base de dados. Depois disso, o primeiro filtro aplicado foi a remoção dos arquivos duplicados em ambas as bases de dados, sobrando 395 arquivos aptos para serem analisados. Por fim, foi adotado um critério de seleção de no máximo 6 artigos para serem analisados por setor.

Considerações Finais

Os estudos mais pertinentes sobre a aplicação do conceito da Indústria 4.0 no setor alimentício demonstram que há muitos estudos e implementações a respeito da produção básica como agricultura e pecuária, entretanto pouco se encontrou a respeito do processamento dos alimentos, devido ser uma área de maior complexidade e com acesso mais restrito.

Referências

ADNAN, Q.; KAIDI, H. M.; MASROM, M.; HAMZAH, H. S. IoT Implementation Framework to Support Industry 4.0 in the Malaysian Manufacturing Industries: A Systematic Review. *International Journal of Computing and Digital Systems*, v. 14, n. 1, p. 875-888, 2023. SETHI, R.; BHUSHAN, B.; SHARMA, N.; KUMAR, R.; KAUSHIK, I. Applicability of Industrial IoT in Diversified Sectors: Evolution, Applications and Challenges. In: KUMAR, R.; SHARMA, R.; PATTNAIK, P. K. (eds) *Multimedia Technologies in the Internet of Things Environment. Studies in Big Data*, v. 79. Springer, Singapore, 2021.

Palavras Chave

Indústria 4.0, Internet das coisas, Automação

INDÚSTRIA 4.0 – COMO OS DISPOSITIVOS CONECTADOS ESTÃO TRANSFORMANDO AS FÁBRICAS

1 INTRODUÇÃO

Assim como os dispositivos móveis, como smartphones e tablets, tornaram-se indispensáveis no cotidiano contemporâneo, a inserção tecnológica afirma-se cada vez mais crucial no contexto industrial, especialmente no âmbito da automação. Nesse cenário, o termo “Indústria 4.0” foi cunhado em 2011, por meio de uma iniciativa conjunta entre o governo federal da Alemanha, universidades e empresas, para designar sistemas de manufatura de ponta (ADNAN *et al.*, 2023). Essa denominação abrange o uso de tecnologias atualmente em evidência, como inteligência artificial, automação e robótica, aplicadas ao ambiente fabril.

Dentre as tecnologias fundamentais para a implementação da Indústria 4.0, destaca-se a Internet das Coisas (IoT), que promove a interconexão de dispositivos físicos, veículos, edifícios e outros elementos do mundo real via internet. Conforme apontam Aheleroff *et al.* (2020), além da conectividade, a IoT oferece recursos de grande valia para a indústria, incluindo heterogeneidade, escalabilidade, sensoriamento avançado, geolocalização e personalização.

Em virtude dessas características, observa-se um crescimento significativo no número de implementações de IoT no setor industrial, acompanhado por uma maior acessibilidade dessas ferramentas. Plataformas desenvolvidas por empresas como IBM e SLM Solutions exemplificam iniciativas que visam facilitar essa integração (SARAVANAN *et al.*, 2022). Esse avanço reflete-se também no meio acadêmico, onde pesquisas buscam criar modelos viáveis para uso comercial futuro. Um exemplo é a abordagem baseada no paradigma de engenharia orientada a modelos, proposta por Ziaei, Zamani e Bohlooli (2020), destinada a simplificar o design e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento em tempo real.

É importante ressaltar que a IoT é intrinsecamente versátil e encontra-se em constante evolução. Sethi *et al.* (2020) destacam diversas aplicações emergentes na indústria, tais como cibersegurança, análise de dados e integração com blockchain, evidenciando o desenvolvimento contínuo dessa tecnologia ao longo do tempo. Diante desse panorama, a difusão da IoT na maioria das indústrias apresenta-se como uma tendência irreversível.

No entanto, o setor industrial é segmentado, e seus diferentes nichos tendem a se desenvolver em ritmos distintos. Torna-se necessário, portanto, investigar como a IoT impacta cada setor individualmente, a fim de mapear quais ambientes apresentam tecnologias consolidadas e quais carecem de estudos aprofundados. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo realizar essa investigação, identificando novas possibilidades de pesquisa e implementação na área.

A estrutura deste artigo está organizada em cinco seções: a introdução; a metodologia, na qual são explicitados os critérios de pesquisa e seleção dos artigos; os resultados, que apresentam os dados obtidos; a discussão, que aborda os principais setores individualmente; e, por fim, a conclusão.

2 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi conduzida em sete etapas: 1) definição da questão de pesquisa, 2) definição dos setores a serem buscados na literatura, 3) definição das strings de pesquisa e coleta dos artigos, 4) tratamento dos artigos, 5) apresentação dos resultados, 6) interpretação dos resultados e 7) apresentação da revisão e conclusões acerca do tema.

Primeiramente para definir a questão de pesquisa, utilizou-se a estratégia TQO, onde: T (tema) = “indústria 4.0 e IoT”, Q (qualificador) = “implementação das novas tecnologias” e O

(objeto) = “setores industriais”. Assim, tem-se: Quais são os principais setores industriais que são aplicados os conceitos de indústria 4.0 e IoT na atualidade?

A partir disso, escolheu-se para quais setores industriais deveria ser feita a pesquisa. Para tanto, foi realizada uma busca dos principais segmentos de indústria no mercado e chegou-se em sete esferas de atuação: alimentício, aeroespacial, químico, automobilístico, farmacêutico, metalúrgico, têxtil.

A etapa seguinte consistiu em definir as strings de busca para cada um dos setores determinados e realizar a coleta bruta dos artigos nas bases de dados. A busca foi realizada no período entre outubro de 2023 e fevereiro de 2024 no Web of Science e no Scopus, visando coletar principalmente artigos publicados entre os anos de 2019 e 2023. As strings utilizadas estão agrupadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Strings utilizadas por setores

Setor	String
Alimentício	(industry 4.0 AND IoT) AND (food industry OR beverage industry OR food chain)
Aeroespacial	(industry 4.0 AND IoT) AND (Aerospace)
Químico	(industry 4.0 AND IoT) AND (chemical industry)
Automobilístico	(industry 4.0 AND IoT) AND (automotive industry)
Farmacêutico	(industry 4.0 AND IoT) AND (pharmaceutical OR pharma 4.0)
Metalúrgico	(industry 4.0 AND IoT) AND (steel manufacturing OR steel OR aluminium OR metallurgical)
Têxtil	(industry 4.0 AND IoT) AND (textile)

Fonte: autores.

O acesso foi realizado mediante o portal de periódicos CAPES, de maneira que a busca inicial utilizando as strings foi realizada por todos os pesquisadores a fim de garantir a qualidade das mesmas e assegurar os resultados. Em sequência, designou-se que cada um dos pesquisadores ficaria responsável por realizar o estudo de dois setores. Feita a coleta dos artigos em cada base, utilizou-se o software *Mendeley Reference Manager*, para eliminar os artigos duplicados, e o software *Vosviewer*, para realizar um estudo dos artigos mais relevantes.

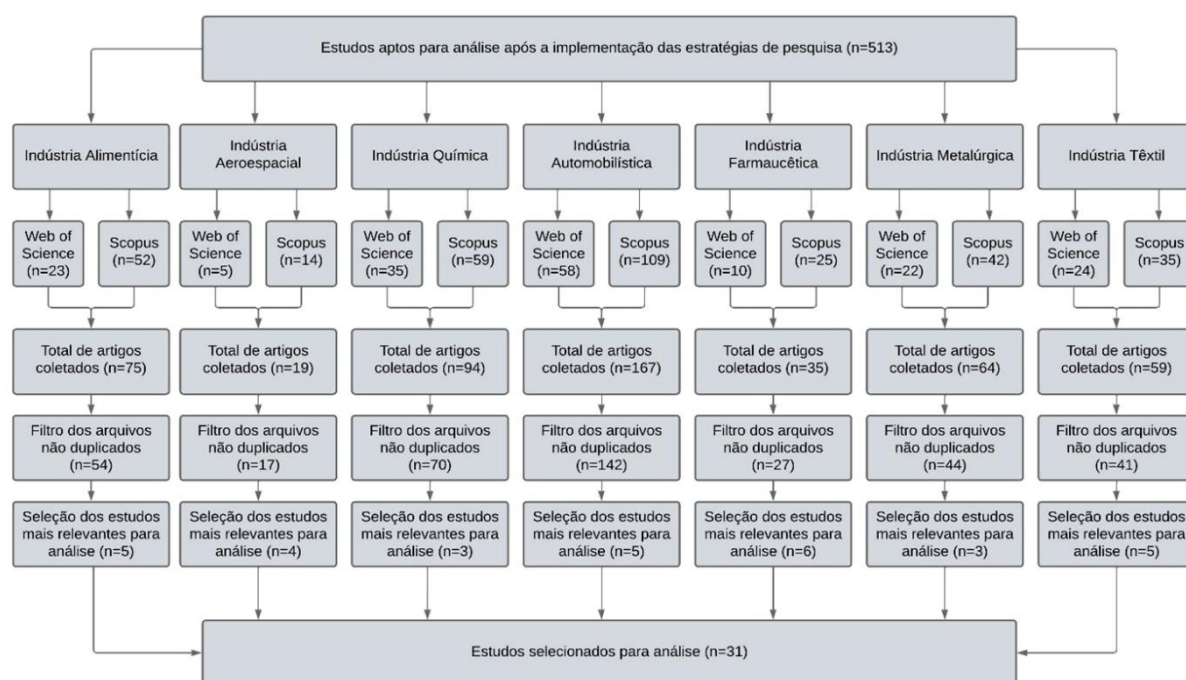
A partir de cada base de dados, exportou-se um arquivo com um resumo das informações dos trabalhos resultantes do uso das strings. Com esses arquivos, por meio do *Vosviewer*, foi feita uma análise de citação e de co-citação, que indicam quais autores foram mais citados tanto por artigos em geral quanto pelos artigos resultados das strings, a fim de determinar quais trabalhos são mais importantes para cada tema. Em adição, também foi feita uma análise dentro dos próprios bancos de dados, já que neles existe uma opção de filtro por relevância, que leva em conta outros fatores além da quantidade de citações, como os periódicos, instituições e países envolvidos.

3 RESULTADOS

Após a implementação das estratégias de pesquisa utilizadas, foram identificados um total de 513 artigos aptos para análise, sendo esses a soma dos trabalhos encontrados para cada setor e em cada base de dados. Depois disso, o primeiro filtro aplicado foi a remoção dos arquivos duplicados em ambas as bases de dados, sobrando 395 arquivos aptos para serem analisados. Em seguida, os artigos resultantes passaram pelo filtro do *Vosviewer* e restaram 31 trabalhos para o estudo final.

A Figura 1 é um fluxograma que mostra os passos realizados para chegar na quantidade de arquivos que foram selecionados para analisar os impactos da indústria 4.0 aliadas a IoT em cada um dos setores estudados. Além disso, no Quadro 2 estão representados os principais artigos escolhidos separados por setor industrial, retratando os principais temas abordados por cada área de estudo.

Figura 1 - Percurso da coleta e tratamento de artigos das bases de dados selecionadas.



Fonte: autores.

Quadro 2 - Separação dos principais artigos e os seus temas

Setor	Principais referências	Temas abordados
Alimentício	Miranda <i>et al.</i> (2019)	<ul style="list-style-type: none"> ● Controle de qualidade ao longo da cadeia de produção; ● Redução de desperdício na produção; ● Automação de processos; ● Monitoramento em tempo real.
	Dadhaneeya, Nema e Aurora (2023)	
	Morrone <i>et al.</i> (2022)	
	Panda <i>et al.</i> (2019)	
	Khan, Byun e Park (2020)	

Aeroespacial	Crossley e Ratchev (2018)	<ul style="list-style-type: none"> ● Aplicação de IA para o processamento de imagem para avaliação de qualidade; ● Controle de estoque de materiais essenciais.
	Corallo, Del Vecchio e Lazoi (2022)	
	Gaudenzi <i>et al.</i> (2020)	
	Haghnegahdar, Joshi e Dahotre (2022)	
Automobilístico	Ghosh <i>et al.</i> (2022)	<ul style="list-style-type: none"> ● Mudança no modelo de produção das indústrias automotivas; ● Eficiência dos processos produtivos e administrativos/estratégicos com a implementação da IoT.
	Harris, Ndiaye e Farrell (2020)	
	Filali Rotbi, Motahhir e Ghzizal (2022)	
	Hakim, Singgih, e Gunarta (2022)	
	Tasmin <i>et al.</i> (2020)	
Química	Priyanka, Maheswari e Thangavel (2021)	<ul style="list-style-type: none"> ● Transporte de petróleo por oleodutos; ● Desenvolvimento de processos químicos industriais mais sustentáveis.
	Ntamo <i>et al.</i> (2022)	
	Bellini <i>et al.</i> (2022)	
Farmacêutico	Rossetti e Handfield (2011)	<ul style="list-style-type: none"> ● Desenvolvimento de um modelo eficaz de gerenciamento de cadeia produtiva para o setor; ● Implementação do IoT em equipamentos de monitoramento de "healthcare".
	Liao <i>et al.</i> (2021)	
	Ntamo, D., Lopez-Montero, E. (2022)	
	Rejeb <i>et al.</i> (2020)	
	Prajwal, Muddukrishna e Vasantharaju (2020)	
	Kuruvilla <i>et al.</i> (2023)	
Metalúrgico	Nkonyana <i>et al.</i> (2019)	<ul style="list-style-type: none"> ● Implementação de algoritmos para aumentar a eficácia da detecção de falhas na cadeia produtiva e de produtos defeituosos.
	Li <i>et al.</i> (2020)	
	Hsu <i>et al.</i> (2017)	
Têxtil	Manglani, Hodge e Oxenham (2019)	<ul style="list-style-type: none"> ● Proposta de sistema de monitoramento; ● Implementação de <i>blockchain</i> para rastreamento; ● Entrevistas com gestores para verificar abertura em relação à aplicação de IoT na indústria.
	Dal Forno <i>et al.</i> (2023)	
	Falani, Aguiar e Forno (2021)	
	Sari, Gules e Yigitol, B. (2020)	
	Faridi <i>et al.</i> (2020)	

Fonte: autores.

4 DISCUSSÕES

4.1 ALIMENTÍCIO

Os estudos mais pertinentes sobre a aplicação do conceito de Indústria 4.0 no setor alimentício indicam uma predominância de pesquisas e implementações voltadas à produção primária, como a agricultura e a pecuária. Em contrapartida, observa-se uma escassez de literatura dedicada ao processamento de alimentos, fato atribuído à maior complexidade e ao acesso restrito a essa etapa da cadeia produtiva.

O setor agroalimentar é fundamental para o desenvolvimento econômico global e desempenha um papel vital na segurança alimentar. No entanto, enfrenta desafios

significativos, incluindo alterações climáticas, rigorosas exigências de controle de qualidade, proteção ambiental e legislações complexas. Nesse contexto, a indústria é impactada diretamente pelas tecnologias e estratégias da Indústria 4.0. A adoção de soluções como estufas inteligentes, maquinário moderno, robótica, drones, sensores inteligentes, redes sem fio e fazendas verticais exemplifica essa transformação (MIRANDA *et al.*, 2019). Simultaneamente, integram-se práticas de sustentabilidade focadas nos eixos econômico, social e ambiental, conforme abordado por Dadhaneeya, Nema e Arora (2023).

No âmbito da criação animal, a pecuária de precisão apresentou avanços notáveis. O advento de novas tecnologias — como câmeras, sensores e redes sem fio — possibilitou a identificação rápida de sinais vitais e alterações nos padrões comportamentais dos animais. Isso facilita o diagnóstico precoce de doenças e a tomada de ações preventivas. Além disso, foram desenvolvidos sistemas de rastreamento, ordenha automática e monitoramento de desempenho. Contudo, conforme destacam Morrone *et al.* (2022), a aplicação dessas tecnologias ainda impõe desafios éticos e econômicos que necessitam ser superados.

Paralelamente, a agricultura beneficiou-se da implementação da agricultura de precisão. O uso de sistemas de irrigação automatizados, monitoramento de colheitas e estufas inteligentes permite a utilização eficaz de recursos como energia, água, pesticidas e fertilizantes (DADHANEYYA; NEMA; ARORA, 2023). Essa abordagem visa minimizar desperdícios, resultando no aumento da produção e da lucratividade a longo prazo.

Visando aprimorar o controle de qualidade, diversos modelos tecnológicos têm sido propostos. Panda *et al.* (2019), por exemplo, apresentam um sistema baseado em sensores universais, adaptável a diferentes cenários industriais e fundamentado em um modelo de informação padronizado. Nesse sistema, microcontroladores coordenam a coleta de dados e seu envio para armazenamento em nuvem, garantindo uma aquisição de informações robusta. Adicionalmente, modelos de controle baseados em blockchain estão sendo estudados, uma vez que facilitam o rastreamento em toda a cadeia de suprimentos e registram todas as trocas de propriedade ao longo do processo (KHAN; BYUN; PARK, 2020).

Em suma, fica evidente que, embora o setor agroalimentar enfrente obstáculos como mudanças climáticas e demandas por qualidade, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 demonstra uma resposta efetiva a esses desafios. A integração de sensores universais e blockchain para rastreabilidade, aliada às práticas de precisão na agricultura e pecuária, visa não apenas aumentar a eficiência produtiva, mas também assegurar a sustentabilidade e a qualidade ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

4.2 AEROESPACIAL

As publicações mais significativas sobre a integração da Indústria 4.0 no setor aeroespacial ressaltam a complexidade da implementação de novas tecnologias neste segmento, ao mesmo tempo em que destacam sua grande importância para a otimização da produção e do controle de estoques de materiais específicos.

Para que o processo de otimização seja efetivo, é imprescindível que o sistema disponha de dados quantitativos precisos e digitalizados. No entanto, conforme apontam Crossley e Ratchev (2018), tais condições são difíceis de obter no ambiente de manufatura aeroespacial. Grande parte das tarefas ainda é realizada manualmente e submetida à inspeção humana, gerando uma dependência de operadores para o registro de dados. Esse cenário torna o processo subjetivo, moroso e suscetível a erros humanos.

No que tange ao gerenciamento de materiais, um dos principais gargalos ocorre no controle de estoque de materiais indiretos, tais como fresas, pastilhas, pós-metálicos e óleos lubrificantes. Embora sejam essenciais ao processo produtivo, esses itens frequentemente não estão vinculados a um produto ou ordem de serviço específica. Segundo Corallo, Del Vecchio

e Lazoi (2022), a disponibilidade limitada ou não planejada desses insumos torna-os elementos críticos, estando diretamente associados a atrasos nas operações de aquisição.

Ademais, vale destacar que, no âmbito da produção de satélites em larga escala, a inserção da automação não é tão viável quanto em setores de produção em massa, como o automotivo. Essa limitação deve-se aos elevados custos dos materiais e à maior complexidade dos processos envolvidos. O setor enfrenta desafios robustos, tais como: a ampla diversificação dos requisitos solicitados pelos clientes; a necessidade de redução do tempo de inserção no mercado devido à alta competitividade; a garantia de qualidade em tecnologias complexas; e a exigência de alta confiabilidade, estabilidade e longevidade dos produtos (GAUDENZI *et al.*, 2020; HAGHNEGAHDAR; JOSHI; DAHOTRE, 2022).

Em suma, fica evidente que a otimização do processo aeroespacial enfrenta barreiras significativas, oriundas da escassez de dados quantitativos precisos e da conseqüente dependência da operação humana. O controle de materiais indiretos permanece uma preocupação latente, dado seu potencial para gerar gargalos operacionais. Diante dos desafios impostos pelos custos e pela complexidade técnica, especialmente na produção de satélites, o setor demanda abordagens inovadoras e soluções adaptativas para consolidar a transição para a Indústria 4.0.

4.3 AUTOMOBILÍSTICO

A literatura mais relevante sobre a convergência do setor automotivo com os conceitos de Indústria 4.0 e IoT destaca a profunda revolução impulsionada por essas tecnologias. O consenso acadêmico aponta para melhorias significativas de desempenho, tanto na eficiência das linhas de produção quanto nos processos administrativos, estes últimos beneficiados por um controle de dados corporativos mais rigoroso.

Nesse contexto, a integração de dispositivos automotivos com sensores, atuadores e softwares apresenta-se como um processo inevitável e em expansão. Tal fenômeno é impulsionado pela demanda crescente por análises precisas dos dados industriais, visando maximizar a eficiência produtiva (GHOSH *et al.*, 2022). Em decorrência disso, surge a necessidade premente de profissionais qualificados, aptos a operar em sinergia com essas novas tecnologias.

No entanto, há desafios na formação de capital humano. Uma pesquisa conduzida com profissionais da indústria automotiva revelou que 72,2% deles apresentavam lacunas de conhecimento em áreas relacionadas à IoT (HARRIS; NDIHAVE; FARRELL, 2020). Esse dado evidencia a urgência de programas de capacitação que permitam aos trabalhadores adequarem-se às transformações impostas por linhas de produção tecnologicamente avançadas.

Outra contribuição estrutural da IoT na indústria automotiva foi a alteração do modelo produtivo padrão, tradicionalmente caracterizado por uma hierarquia rígida e fluxo vertical de informações (FILALI ROTBI; MOTAHHIR; EL GHZIZAL, 2022). O modelo antigo, focado exclusivamente nos interesses da empresa, mostra-se inadequado ao mercado atual, onde os clientes exigem níveis crescentes de customização. Essas mudanças são fundamentais para revitalizar os contextos produtivos, uma vez que o crescimento empresarial está intrinsecamente ligado à satisfação do consumidor (HAKIM; SINGGIH; GUNARTA, 2022).

É importante ressaltar que o aumento da eficiência nas linhas de produção não se reflete apenas na ampliação do volume de veículos fabricados. Conforme apontam Tasmin *et al.* (2020), essa eficiência traduz-se também na redução de custos operacionais, na capacidade de adaptação às demandas dos clientes e na melhoria da qualidade total dos serviços.

Portanto, as melhorias proporcionadas pela aliança entre a Indústria 4.0 e a IoT no setor automotivo são abrangentes. Observa-se uma otimização substancial dos processos produtivos,

bem como uma maior assertividade nos processos administrativos e estratégicos, resultado direto do aprimoramento na análise dos dados gerados pelas empresas.

4.4 QUÍMICO

A literatura acerca da integração da Indústria 4.0 e da IoT na indústria química distingue-se por apresentar um viés notadamente mais técnico em comparação aos trabalhos voltados a outros segmentos, como o setor automotivo.

Um exemplo elucidativo dessa aplicação é o transporte de petróleo por meio de oleodutos inteligentes, geridos por redes de sensores sem fio, dispositivos de monitoramento e sistemas de computação avançada (PRIYANKA; MAHESWARI; THANGAVEL, 2021). Tais tecnologias são indispensáveis para o aprimoramento dos processos na indústria química, que, por sua natureza intrinsecamente meticulosa e de alto risco, demandam suporte tecnológico robusto para assegurar a eficiência e a segurança operacional.

Além da eficiência, a sustentabilidade assume um papel central neste setor. Diferentemente de outras indústrias, as falhas operacionais ou o excesso de produção no ramo químico podem resultar em danos ambientais severos. Nesse contexto, a IoT torna-se uma ferramenta fundamental, pois viabiliza a implementação de processos mais sustentáveis aliados a um monitoramento rigoroso e contínuo de todas as etapas produtivas (NTAMO *et al.*, 2022).

Outra aplicação relevante refere-se à integração de dados entre diferentes unidades fabris, exemplificada pelo Projeto SODA R&D, iniciativa financiada pelo governo regional da Toscana (BELLINI *et al.*, 2022). De maneira análoga ao observado no setor automotivo, a IoT potencializou a geração e a análise de dados na indústria química. Esse avanço conferiu maior assertividade à gestão da informação, viabilizando, por exemplo, o acompanhamento em tempo real de plantas industriais complexas.

4.5 FARMACÊUTICO

Os artigos mais relevantes sobre a implementação do conceito de Indústria 4.0 no setor farmacêutico evidenciam o atraso desse segmento em relação a outros setores industriais. Nesse sentido, o ponto central discutido na literatura é a necessidade de reestruturação da cadeia produtiva dos fabricantes, visando tornar todas as etapas mais robustas e interconectadas.

Embora a indústria farmacêutica seja o segundo ramo industrial mais lucrativo do mundo (ROSSETTI; HANDFIELD; DOOLEY, 2011), suas fábricas ainda operam majoritariamente com foco na produção em massa, em detrimento de uma produção adaptativa e contínua (LIAO *et al.*, 2021). Essa limitação tornou-se evidente durante a pandemia de Covid-19. O contexto de quarentena global ressaltou a urgência por tecnologias robustas, capazes de atender a demandas variáveis com menor dependência da intervenção humana direta nos processos produtivos (NTAMO *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, diversos modelos de gerenciamento de cadeia produtiva têm sido propostos para o setor. Tais modelos concentram-se em múltiplas aplicações de IoT dentro das organizações para aprimorar a eficiência operacional, promovendo a interconexão entre as etapas produtivas. Exemplos incluem o uso da tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*) (REJEB *et al.*, 2020) e a aplicação de técnicas computacionais para otimizar a seleção de fornecedores e antever picos de demanda.

Adicionalmente, existe uma vertente de pesquisa voltada ao *healthcare* (assistência médica), com foco no cuidado de pacientes portadores de condições crônicas que exigem monitoramento constante. Estudos nessa área exploram a aplicação de IoT em dispositivos capazes de coletar dados clínicos — como pressão arterial e níveis de glicose — e transmiti-los

via nuvem para as equipes médicas responsáveis (PRAJWAL; MUDDUKRISHNA; VASANTHARAJU, 2020).

Por fim, há um esforço acadêmico para integrar a área de *healthcare* à cadeia produtiva farmacêutica por meio de sistemas centralizados. A proposta é que tais sistemas abranjam desde a produção e o transporte de medicamentos até o monitoramento e armazenamento de dados clínicos em hospitais, unificando o setor de saúde para facilitar e agilizar o atendimento aos usuários (KURUVILLA *et al.*, 2023).

Portanto, conclui-se que, apesar de sua alta rentabilidade e importância vital para a humanidade, a indústria farmacêutica ainda se apresenta rudimentar no que tange à digitalização de sua cadeia produtiva, especialmente quando comparada aos avanços observados em outros setores industriais.

4.6 METALÚRGICO

Embora as pesquisas sobre a aplicação da Indústria 4.0 no setor metalúrgico sejam quantitativamente menores em comparação a outras áreas, elas evidenciam um segmento tecnologicamente mais consolidado no uso de IoT em suas linhas de produção, contrastando, por exemplo, com o cenário farmacêutico. Tal constatação baseia-se na orientação predominante dos estudos: em vez de proporem reestruturações nos modelos de cadeia produtiva, os trabalhos concentram-se no aprimoramento técnico de sistemas de detecção de falhas e no controle de qualidade.

Nesse contexto, a literatura destaca o emprego extensivo de técnicas de *Machine Learning*, tais como *Random Forest*, *Artificial Neural Networks* e *Support Vector Machines*. Segundo Nkonyana *et al.* (2019), a implementação de redes neurais aproveita o intenso fluxo de dados já existente nas metalúrgicas para detectar anomalias na cadeia de produção com agilidade, mitigando, assim, grandes perdas operacionais.

Adicionalmente, observa-se a implementação de algoritmos baseados em visão computacional. Essas ferramentas permitem a identificação e a eliminação de produtos defeituosos ao final da linha de produção, realizando a análise automática de parâmetros físicos como comprimento, largura e refletividade (LI *et al.*, 2020; HSU *et al.*, 2017).

4.7 TÊXTIL

A análise da literatura revela que a implementação da IoT na indústria têxtil encontra-se em estágio incipiente, embora apresente uma trajetória de crescimento significativa. Um dos principais obstáculos identificados reside na acentuada heterogeneidade entre os seus subsetores, característica que complexifica a comunicação e a integração eficiente dos processos (MANGLANI; HODGE; OXENHAM, 2019).

Segundo Dal Forno *et al.* (2023), as aplicações da tecnologia neste setor podem ser classificadas em quatro eixos principais: planejamento e administração da cadeia produtiva; design e desenvolvimento; monitoramento e manutenção de equipamentos; e utilização de dispositivos vestíveis (*wearables*). Essa diversidade de aplicações oferece oportunidades substanciais para a otimização de processos e a redução de custos operacionais, além de ampliar o acesso a dados estratégicos que fundamentam a tomada de decisão.

Estudos de caso ilustram cenários distintos de adoção tecnológica. No Brasil, uma pesquisa realizada com quatro grandes indústrias têxteis de Santa Catarina constatou que a IoT figura como a terceira tecnologia da Indústria 4.0 mais utilizada, embora sua aplicação apresente grande variabilidade entre as empresas (FALANI; AGUIAR; FORNO, 2021). Em contrapartida, um estudo conduzido na Turquia com gestores de 427 empresas de diversos segmentos indicou um panorama menos favorável: o setor têxtil apresentou os menores índices

de conscientização e prontidão para a Indústria 4.0, sugerindo barreiras à implementação dessas inovações (SARI; GULES; YIGITOL, 2020).

Outro ponto de destaque é a integração entre IoT e Blockchain visando a rastreabilidade dos produtos durante todo o ciclo de manufatura (FARIDI *et al.*, 2020). Essa abordagem é particularmente relevante para mitigar os problemas de comunicação entre os diferentes subsetores da cadeia têxtil, além de apresentar um potencial significativo para a redução de custos.

Portanto, a indústria têxtil configura-se como um campo emergente no contexto da IoT. Apesar de o volume de produções acadêmicas ainda ser restrito quando comparado a outros setores, a área demonstra-se promissora, impulsionada pelo crescimento do interesse científico e pela vasta gama de possibilidades de implementação.

5 CONCLUSÕES

A partir das análises individuais dos setores, o primeiro ponto a ser destacado é a predominância de pesquisas no segmento automobilístico. A superioridade desse setor deve-se, sobretudo, à operação industrial em larga escala, impulsionada pela elevada demanda social por veículos. Além disso, a complexidade tecnológica do produto final exige que todas as etapas do processo produtivo sejam minuciosamente integradas, garantindo a qualidade e a segurança do bem manufaturado.

Paralelamente, evidenciou-se que o nível de maturidade na implementação da Indústria 4.0 e da IoT varia consideravelmente entre os segmentos. Setores como o farmacêutico e o têxtil apresentam-se ainda como emergentes, buscando elaborar modelos de gerenciamento que integrem efetivamente suas cadeias produtivas aos novos conceitos tecnológicos. Em contrapartida, os setores alimentício, químico e metalúrgico demonstram maior consolidação, focando em aplicações específicas de IoT, como a detecção de falhas e o monitoramento ambiental, visando à eficiência operacional e à segurança.

Um caso singular é o do segmento aeroespacial, no qual se observou uma notável carência de literatura acadêmica. Essa escassez atribui-se ao caráter restrito do setor, composto por poucas empresas — muitas vezes estatais e operando sob sigilo estratégico — e pela dificuldade de implementação em produções de baixo volume e altíssima complexidade e customização.

Quanto às perspectivas futuras, infere-se que o setor automobilístico continuará liderando a integração tecnológica, demandando sensores avançados e novos protocolos de comunicação via 5G para suportar a conectividade veicular. Para os setores emergentes (farmacêutico e têxtil), a tendência reside no desenvolvimento de soluções para rastreabilidade total e integração da cadeia. Já nos setores consolidados (alimentício, químico e metalúrgico), espera-se um foco no aprimoramento contínuo, priorizando processos sustentáveis, redução de desperdícios e rigoroso controle de qualidade.

É importante destacar que, a partir deste trabalho, acredita-se que alguns segmentos específicos de pesquisa envolvendo IoT e Indústria 4.0 serão desenvolvidos amplamente ao longo dos próximos anos, como integração, inteligência artificial e cibersegurança. Dentro dessas áreas, muitas melhorias podem ser implementadas, como a elaboração de protocolos de comunicação que permitam uma operação mais conectada entre diferentes fábricas e setores, a aplicação de Inteligência Artificial (IA) para previsão de faltas visando otimizar a manutenção de equipamentos, a implementação de mecanismos de segurança contra ataques cibernéticos, bem como métodos de criptografia e proteção de dados, dentre outros.

Diante do substancial crescimento desse tipo de aplicações, além das questões técnicas, surgem diversos questionamentos éticos, que abrem espaço para a elaboração de outros trabalhos acadêmicos abrangendo esse aspecto. Uma das questões mais evidentes consiste em

uma possível demissão em massa ocasionada pela substituição de trabalho humano por inteligências artificiais, dada a sua integração cada vez maior com os dispositivos dentro de uma indústria. Adicionalmente, também existem discussões acerca da autonomia das IA's, sobre o quanto elas deveriam controlar o processo produtivo, além de determinar quem deveria ser responsabilizado no caso de algum erro cometido por elas.

Portanto, embora a implementação de IoT na indústria apresentar um crescimento significativo nos últimos anos, esse crescimento não ocorre de modo uniforme entre diferentes setores. Nesse contexto, ficou evidente a necessidade de fomentar pesquisas voltadas aos segmentos mais negligenciados ou complexos, como o farmacêutico, o têxtil e o aeroespacial. Ademais, para além do aspecto tecnológico, é imperativo considerar as implicações sociais dessas mudanças, refletindo sobre o papel do ser humano em um cenário industrial cada vez mais automatizado e conectado.

REFERÊNCIAS

ADNAN, Qusay et al. IoT Implementation Framework to Support Industry 4.0 in the Malaysian Manufacturing Industries: A Systematic Review. **International Journal of Computing and Digital Systems**, v. 14, n. 1, p. 875-888, 2023.

AHELEROFF, Shohin et al. IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study. **Advanced engineering informatics**, v. 43, 2020.

BELLINI, Pierfrancesco et al. High level control of chemical plant by industry 4.0 solutions. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 26, 2022.

CORALLO, A.; DEL VECCHIO, V.; LAZOI, M. Technologies and Trends leading the Digital Transformation: An Aerospace case study. In: **Proceedings of the 17th IFKAD International Forum on Knowledge Asset Dynamics, Lugano, Switzerland**. 2022.

CROSSLEY, Richard; RATCHEV, Svetan. Aerospace assembly gap measurement using low cost smart tools with machine vision. In: **International Precision Assembly Seminar**. Cham: Springer International Publishing, 2018.

DADHANEEYA, Harsh; NEMA, Prabhat K.; ARORA, Vinkel Kumar. Internet of Things in food processing and its potential in Industry 4.0 era: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 139, 2023.

DAL FORNO, Ana Julia et al. Industry 4.0 in textile and apparel sector: a systematic literature review. **Research Journal of Textile and Apparel**, v. 27, n. 1, p. 95-117, 2023.

FALANI, Leila; AGUIAR, Cátia; FORNO, Ana Julia Dal. Initial overview of industry 4.0 in textile companies in Santa Catarina. In: **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. 2021.

FARIDI, Muhammad Shakeel et al. Blockchain and IoT based textile manufacturing traceability system in industry 4.0. In: **International conference on security, privacy and anonymity in computation, communication and storage**. Cham: Springer International Publishing, 2020.

FILALI ROTBI, Maha; MOTAHHIR, Saad; EL GHZIZAL, Abdelaziz. Blockchain-based CPS and IoT in the automotive supply chain. In: **Advances in blockchain technology for cyber physical systems**. Cham: Springer International Publishing, 2022.

GAUDENZI, Paolo et al. Smart manufacturing in the framework of space industry. An industry 4.0 approach to large scale production of satellite constellations. In: **INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS: IAC PROCEEDINGS**. International Astronautical Federation, IAF, 2020.

GHOSH, Raj Krishan et al. Intelligent IoT for automotive industry 4.0: Challenges, opportunities, and future trends. **Intelligent Internet of Things for healthcare and industry**, p. 327-352, 2022.

HAGHNEGAHDAR, Lida; JOSHI, Sameehan S.; DAHOTRE, Narendra B. From IoT-based cloud manufacturing approach to intelligent additive manufacturing: Industrial Internet of Things—An overview. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 119, n. 3, p. 1461-1478, 2022.

HAKIM, Inaki Maulida; SINGGIH, Moses Laksono; GUNARTA, I. Ketut. Evaluating critical success factors for implementation of internet of things (IoT) using DEMATEL: A case of Indonesian automotive company. In: **Proceedings of the 2022 international conference on engineering and information technology for sustainable industry**. 2022.

HARRIS, Mohammad; NDIAYE, Mamadou; FARRELL, Peter. **Integration of industry 4.0 and internet of things in the automotive and motorsports sectors: An empirical analysis**. SAE Technical Paper, 2020.

HSU, Chao-Yung et al. Vision-based automatic identification tracking of steel products for intelligent steel manufacturing. In: **2017 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)**. IEEE, 2017.

KHAN, Prince Waqas; BYUN, Yung-Cheol; PARK, Namje. IoT-blockchain enabled optimized provenance system for food industry 4.0 using advanced deep learning. **Sensors**, v. 20, n. 10, p. 2990, 2020.

KURUVILLA, Jemimah M. et al. Implementation of industry 4.0 in supply chain management in the healthcare industry. In: **2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)**. IEEE, 2023.

LI, Fucun et al. Towards industrial internet of things in steel manufacturing: a multiple-factor-based detection system of longitudinal surface cracks. In: **2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)**. IEEE, 2020.

LIAO, Huchang et al. Non-cooperative behavior management in group decision making by a conflict resolution process and its implementation for pharmaceutical supplier selection. **Information Sciences**, v. 567, p. 131-145, 2021.

MANGLANI, Hitesh; HODGE, George L.; OXENHAM, William. Application of the internet of things in the textile industry. **Textile Progress**, v. 51, n. 3, p. 225-297, 2019.

MIRANDA, Jhonattan et al. Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0. **Computers in Industry**, v. 108, p. 21-36, 2019.

MORRONE, Sarah et al. Industry 4.0 and precision livestock farming (PLF): an up to date overview across animal productions. **Sensors**, v. 22, n. 12, p. 4319, 2022.

NKONYANA, Thembinkosi et al. Performance evaluation of data mining techniques in steel manufacturing industry. **Procedia Manufacturing**, v. 35, p. 623-628, 2019.

NTAMO, D. et al. Industry 4.0 in action: Digitalisation of a continuous process manufacturing for formulated products. **Digital Chemical Engineering**, v. 3, 2022.

PANDA, Santosh Kumar et al. IoT retrofitting approach for the food industry. In: **2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**. IEEE, 2019.

PRAJWAL, A. T.; MUDDUKRISHNA, B. S.; VASANTHARAJU, S. G. Pharma 4.0—impact of the internet of things on health care. **International Journal of Applied Pharmaceutics**, v. 12, n. 5, p. 64, 2020.

PRIYANKA, E. Bhaskaran; MAHESWARI, Chennippan; THANGAVEL, Subramaniam. A smart-integrated IoT module for intelligent transportation in oil industry. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, v. 34, n. 3, p. e2731, 2021.

REJEB, Abderahman et al. Internet of Things research in supply chain management and logistics: A bibliometric analysis. **Internet of Things**, v. 12, p. 100318, 2020.

ROSSETTI, Christian L.; HANDFIELD, Robert; DOOLEY, Kevin J. Forces, trends, and decisions in pharmaceutical supply chain management. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, n. 6, p. 601-622, 2011.

SARAVANAN, G. et al. Implementation of IoT in production and manufacturing: An Industry 4.0 approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 51, p. 2427-2430, 2022.

SARI, Tuğba; GÜLEŞ, Hasan Kürşat; YIĞİTOL, Büşra. Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry. **Advances in Production Engineering & Management**, v. 15, n. 1, p. 57-68, 2020.

SETHI, Rohan et al. Applicability of industrial IoT in diversified sectors: evolution, applications and challenges. **Multimedia technologies in the Internet of Things environment**, p. 45-67, 2020.

TASMIN, Rosmaini et al. The readiness of automotive manufacturing company on industrial 4.0 towards quality performance. **International Journal of Integrated Engineering**, v. 12, n. 7, p. 160-172, 2020.

ZIAEI, Mahdi; ZAMANI, Bahman; BOHLOOLI, Ali. A model-driven approach for iot-based monitoring systems in industry 4.0. In: **2020 4th International Conference on Smart City, Internet of Things and Applications (SCIOT)**. IEEE, 2020.