

Análise Bibliométrica Sobre A Indústria 4.0 na Engenharia Química

Bibliometric Analysis on Industry 4.0 in Chemical Engineering

Análisis Bibliométrico Sobre la Industria 4.0 en Ingeniería Química

Igor Oliveira Bachieti ¹
Carlos Minoru Nascimento Yoshioka ²
Ana Beatriz Neves Brito ³

Resumo: Este trabalho aborda a Indústria 4.0 no contexto da Engenharia Química, realizando uma análise bibliométrica de artigos com palavras-chave como “*Artificial Intelligence*”, “*Automation*”, “*Chemical engineering*”, “*Internet of Things*” e “*Machine Learning*”. A metodologia envolve revisão bibliográfica do período de 2014 a 2022, e demonstra um crescimento exponencial nas publicações.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Automação; Engenharia Química; Internet das Coisas; Aprendizado da Máquina.

Abstract: This work approaches Industry 4.0 in relation to Chemical Engineering, carrying out a bibliometric analysis of articles with keywords such as "Artificial Intelligence," "Automation," "Chemical Engineering," "Internet of Things," and "Machine Learning." The methodology involves a bibliographic review from the period of 2014 to 2022, and demonstrates an exponential growth in publications.

Keywords: Artificial Intelligence; Automation; Chemical engineering; Internet of Things; Machine Learning.

Resumen: Este trabajo aborda la Industria 4.0 en relación con la Ingeniería Química, realizando un análisis bibliométrico de artículos con palabras clave como "Inteligencia Artificial", "Automatización", "Ingeniería Química", "Internet de las Cosas" y "Aprendizaje Automático". La metodología implica una revisión bibliográfica del período 2014 a 2022, y demuestra un crecimiento exponencial en las publicaciones.

Palabras llave: Artificial Inteligence; Automation; Chemical engineering; Internet of Things; Machine Learning.

1 Introdução

A Indústria 4.0 representa uma nova era de transformação digital que está impactando profundamente diversos setores do mercado, incluindo a engenharia. De acordo com o (CIBOLINI; MUSCIO, 2018) a indústria 4.0 igualmente utilizada para identificar a Quarta Revolução Industrial, sendo esse um movimento que objetiva conectar pessoas, máquinas e

¹Graduado em Engenharia Química. Universidade Federal do Espírito Santo. E-mail: igor.bachieti@gmail.com

² Doutor em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos. E-mail: carlos.yoshioka@ufes.br

³ Doutora em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos. E-mail: ana.brito@ufes.br

dispositivos eletrônicos simultaneamente e em tempo real. Na atualidade, estamos presenciando uma convergência de tecnologias avançadas, como automação, internet das coisas, inteligência artificial (IA) e *machine learning* ou aprendizado da máquina, que estão impulsionando a criação de sistemas inteligentes e conectados. “A indústria 4.0 adota inovações disruptivas aumentando a eficiência e eficácia das operações no sistema socioeconômico” (SLUSARCZYK, 2018).

Considerando a transformação que este tema causa na indústria, tal estudo foi conduzido devido a necessidade de identificar tendências, lacunas e oportunidades na literatura, contribuindo para pesquisa e desenvolvimento da tecnologia para a indústria. Além disso, o trabalho tem como objetivo oferecer uma visão estratégica sobre o panorama dos estudos existentes, orientando futuras pesquisas e práticas no âmbito da integração da Indústria 4.0 com a engenharia química. A revolução tecnológica traz consigo uma série de benefícios, como aumento da eficiência, redução de custos, melhoria da qualidade e maior capacidade de tomada de decisões embasadas em dados. De forma complementar, a Indústria 4.0 promove uma maior interconectividade entre processos e cadeias de suprimentos, abrindo novas possibilidades de colaboração e inovação. Diante desse cenário, compreender e explorar a importância da Indústria 4.0 é essencial para que as empresas se mantenham competitivas e possam se adaptar às demandas de um mercado cada vez mais dinâmico e tecnologicamente avançado.

O objetivo desta pesquisa é analisar a produção científica sobre a Indústria 4.0 no contexto da engenharia química, por meio de uma análise bibliométrica. O estudo busca identificar o avanço das pesquisas na área, mapeando tendências, volume de publicações e os principais veículos de divulgação. Além disso, pretende-se avaliar o crescimento do interesse pelo tema e compreender como a engenharia química tem se inserido nesse cenário de transformação tecnológica.

2 Desenvolvimento

2.1 Fundamentação teórica

“A Indústria 4.0 combina os domínios ciber-físicos e está a revolucionar a produção e o fornecimento de bens e serviços, por meio da interligação entre produtos, processos e consumidores” (LEE, 2015). A interconexão de sistemas, a automação avançada, o uso de sensores inteligentes e a análise de dados em tempo real possibilitam uma otimização dos processos industriais, aumentando a eficiência, reduzindo custos e melhorando a qualidade dos produtos químicos. Segundo (GILCHRIST, 2016) os líderes industriais consideram que a IoT (Internet das

Coisas) proporcionará crescimento e um grande aumento na produtividade. A transformação digital proporcionada permite uma integração completa e harmoniosa entre os diferentes estágios de produção, desde o desenvolvimento de novos materiais até a operação dos equipamentos. Isso resulta em uma maior agilidade, flexibilidade e capacidade de adaptação às demandas do mercado.

Conforme (NEYT; RILEY, 2021) a quarta revolução industrial é vista como o próximo passo evolutivo na fabricação química, sendo que os recursos humanos são importantes, mas novas tecnologias e máquinas estão mudando a maneira com que os químicos de laboratório trabalham. Nesse contexto, podemos incluir a extensão da automação em diferentes etapas dos processos químicos, a quantidade e variedade de dispositivos IoT integrados, a eficiência na coleta e análise de dados em tempo real, e a amplitude da aplicação de algoritmos de *machine learning*. Ao considerar a relação com a engenharia química, é importante reconhecer que a integração de tecnologias avançadas pode desencadear mudanças profundas nos processos tradicionais. “Revisões anteriores discutem avanços técnicos relevantes para a engenharia química, por exemplo, IA” (VENKATASUBRAMANIAN et al., 2019).

A importância da quarta revolução industrial para a engenharia química é a oportunidade de transformação digital e avanço tecnológico na área. “A indústria de manufatura está na vanguarda das transformações ocorridas no domínio da indústria 4.0 e produtos, processos e cadeias de suprimentos serão todos impactados por essas tecnologias” (MAJSTOROVIC; MITROVIC, 2019), e isso requer investimentos significativos em infraestrutura e capacitação.

Segundo (LEPORE; SPIGARELLI, 2020), a evolução dessas tecnologias implica na realocação de fatores produtivos e uma nova dinâmica da força de trabalho. Portanto, ao incorporar os princípios da indústria 4.0 na engenharia química, é essencial adotar uma abordagem equilibrada, maximizando os benefícios enquanto enfrenta os desafios inerentes à transformação digital. “Isso impacta toda a cadeia de valor com a associação de outros serviços de tecnologias em tempo real” (FUCHS, 2018). De acordo com (POWELL, 2020) alguns trabalhos tradicionais estão sendo substituídos pela digitalização 3D, modelagem por computador e impressão 3D multimaterial, e essa tecnologia tem se desenvolvido rapidamente devido a quarta revolução industrial.

“A engenharia química é o campo da ciência aplicada que emprega processos físicos, químicos e bioquímicos para a melhoria da humanidade” (DENN, 2011). A relevância da quarta revolução está na sua capacidade de desenvolver e impulsionar a competitividade, a produtividade

e a sustentabilidade do setor, criando oportunidades para o avanço tecnológico e a conquista de melhores resultados. As tecnologias-chave, como automação, IoT, *machine learning* e inteligência artificial, têm um papel fundamental na transformação dos processos industriais. A automação possibilita a substituição de tarefas manuais por sistemas autônomos, resultando em maior precisão e eficiência. A IoT conecta dispositivos e sensores à rede, permitindo o monitoramento em tempo real e a coleta de dados para análise. O *machine learning* capacita os sistemas a identificar padrões e tendências em grandes volumes de dados, otimizando processos e prevenindo falhas, ao mesmo tempo que realiza análises de dados em tempo real e fornece informações valiosas para a tomada de decisões ágeis e embasadas.

A aplicação da indústria 4.0 na engenharia química promete uma série de benefícios que podem revolucionar o setor. “Os avanços tecnológicos observados na indústria de manufatura e a digitalização e reconversão observadas na fabricação de produtos em direção à fábrica inteligente têm sido um processo crescente e inegável nas últimas décadas” (MADSEN, 2019). Com a adoção de tecnologias avançadas como IoT, *machine learning* e a IA, espera-se um aumento significativo da eficiência operacional, resultando em maior produtividade e redução de custos. Para (THEBELT et al., 2022) os dados desempenham um fator crítico nas aplicações da engenharia química, e os avanços na inteligência artificial permitem novas possibilidades para aumentar as informações obtidas a partir de conjuntos de dados. Além disso, a melhoria na qualidade dos produtos é esperada, uma vez que o *machine learning* pode identificar padrões e falhas, permitindo aprimoramentos contínuos dos processos. A sustentabilidade também se beneficia, pois, a análise de dados em tempo real possibilita a otimização dos recursos e a redução dos impactos ambientais.

2.2 Metodologia

Neste estudo foi adotado a metodologia de revisão sistemática da literatura, utilizando livros e artigos científicos como fontes de dados da base WoS (*Web of Science*), atualizada em 05 de novembro de 2023. A busca realizada utilizou o termo "*Industry 4.0*" na WoS, aprimorada com parâmetros determinados. Resultando em 4832 documentos para o período de 2014 a 2022, essa seleção temporal visa identificar tendências, avanços e a evolução do tema ao longo do tempo. Na análise visual, foram utilizados *Microsoft Excel 365* para gráficos, *VOSviewer 1.6.20* para redes bibliométricas e a ferramenta de análise do WoS para tabelas.

Para melhor compreensão deste trabalho uma das ferramentas utilizadas foi o *VOSviewer*, que segundo (MODAK et al., 2019) é um software para análise de acoplamento bibliográfico,

cocitação, citação, coautoria e coocorrência de palavras-chave que foi projetado para explorar e visualizar redes de coautoria, cocitação ou coocorrência de termos em conjuntos de documentos acadêmicos. O *VOSviewer* oferece uma abordagem intuitiva e interativa para compreender a estrutura e as relações dentro de grandes conjuntos de dados. “Com este software, o estudo analisa acoplamento bibliográfico, coocorrência de palavras-chave de autores e como o periódico está conectado com outros periódicos por meio de análise de cocitação” (CANCINO et al., 2019).

Os documentos referidos neste estudo para análises provêm da base de dados do WoS, atualizada em 05 de novembro de 2023, e a coleta de dados foi realizada em 03 de novembro de 2023, por meio da busca por tópico pelo termo “*Industry 4.0*” da coleção principal da base de dados WoS. A busca realizada foi aprimorada com palavras-chave ligadas ao tema, como: “*Artificial Intelligence*”, “*Automation*”, “*Chemical engineering*”, “*Internet of Things*” e “*Machine Learning*”, e filtrado com a categoria *Chemical Engineering*. Os resultados foram filtrados por data de publicação para o período que compreende os anos de 2014 a 2022, com 4832 resultados encontrados. E para complementar foram utilizados os artigos do período de 2014 a 2023 com o intuito de abranger estudos recentes e relevantes na área. Essa abrangência temporal permitiu a identificação de tendências e avanços ao longo do tempo, bem como a compreensão da evolução do tema em estudo.

Para a construção das tabelas e gráficos, com o intuito de facilitar a interpretação das informações de forma visual, foram utilizados os respectivos programas: *Microsoft excel 365*, para os gráficos; o *VOSviewer*, versão 1.6.20, para o desenvolvimento das redes bibliométricas e figuras; e a ferramenta de análise de resultados do *WoS* para composição de tabelas.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Indústria 4.0 e a engenharia química

A quarta revolução industrial, tem sido destaque pela integração de tecnologias avançadas, redefinindo fundamentalmente os processos de produção e a dinâmica do setor industrial. Segundo (SHEVTSOVA; SHVETS; KASATKINA, 2020) a indústria 4.0 tem sido um tema importante no discurso econômico mundial, e tem o intuito de melhorar a indústria manufatureira.

Por meio disso os dados foram exportados com a busca pelo tópico “*Industry 4.0*” no *Web of Science*, com o intervalo de tempo entre 2014 e 2022, com um total de 4832 registros. A busca realizada foi aprimorada com palavras-chave como: “*Artificial Intelligence*”, “*Automation*”,

“*Chemical engineering*”, “*Internet of Things*” e “*Machine Learning*”, e filtrado com a categoria *Chemical Engineering*. A distribuição anual de documentos publicados desta pesquisa está sendo exibida na Tabela 1. Percebe-se, no período considerado, a quantidade de publicações aumentou a cada ano. Assim, o ano de 2022 é o que apresenta o maior número de publicações, 1308. Além disso, é possível perceber que os dois anos mais recentes do período agregam mais da metade de todas as publicações (50,31%). Para que tenham melhor compreensão das tabelas apresentadas neste estudo, é fundamental informar que as porcentagens utilizadas são calculadas sobre a quantidade total do item que está sendo analisado.

Tabela 1 – Distribuição anual de publicações sobre a indústria 4.0.

Ano	Publicações	Porcentagem
2022	1.310	27,08 %
2021	1.122	23,23 %
2020	700	14,49 %
2019	532	11,01 %
2018	387	8,01 %
2017	264	5,47 %
2016	194	4,02 %
2015	170	3,52 %
2014	153	3,17 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Dispondo os dados da Tabela 1 em forma de gráfico, como se verifica no Gráfico 1, observa-se uma tendência de crescimento exponencial da quantidade de publicações com o tópico “*industry 4.0*” na categoria de “*Engineering Chemical*” no intervalo estudado de 2014 a 2022.

De fato, uma busca na base de dados com os filtros aplicados revela que o ajuste exponencial se mostra adequado com $R^2 = 0,9851$, considerando o período de 2014 até 2022, e equação $Y = 5E - 254e^{0,292x}$, sendo Y a quantidade de publicações e X o ano. Este ajuste permite uma extrapolação que prevê a quantidade anual de publicações dos anos futuros, caso a tendência exponencial observada se mantenha. De acordo com esta previsão, a partir de 2027, a quantidade anual de publicações sobre *industry 4.0* deve ultrapassar a marca de 6.000, ou seja, mais de 16 publicações por dia. Estes resultados apontam que a indústria 4.0 na Engenharia Química é um tema em desenvolvimento e que há interesse crescente nesta área.

Gráfico 1 – Tendência do crescimento das publicações.

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

O interesse neste tema não é restrito ao tipo de publicação feita, sendo este distribuído em vários de documentos diferentes, divididos em 16 tipos diferentes, como exibido na Tabela 2A e Tabela 2B.

Tabela 2A – Distribuição dos tipos de documentos publicados.

Tipo de Documento	Documentos	Porcentagem
Artigos	3.931	78,60 %
Artigo de revisão	399	7,98 %
Documento processual	302	6,04 %
Material editorial	173	3,46 %
Acesso antecipado	62	1,24 %
Correção	40	0,80 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Tabela 2B – Distribuição dos tipos de documentos publicados.

Tipo de Documento	Documentos	Porcentagem
Itens novos	29	0,58 %
Capítulos de livros	27	0,54 %
Carta	16	0,32 %
Reimpressão	11	0,22 %
Revisão do livro	3	0,06 %
Revisão de software	3	0,06 %
Item biográfico	2	0,04 %
Retratção de item	1	0,02 %
Revisão crítica	1	0,02 %
Retratção de publicação	1	0,02 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Na Tabela 2A e Tabela 2B são apresentados um total de 5001 tipos de documentos publicados. O número total é superior ao total de publicações mostrado na Tabela 1, e isso se deve ao fato de um mesmo item pertencer a mais de um grupo listado na Tabela 2A e Tabela 2B. Alguns documentos publicados foram classificados pela *WoS* como mais de um tipo de documento

simultaneamente. Por exemplo, ao filtrar os tipos de documentos por artigos o *WoS* mostra nessa classificação 3.931 artigos, 81 documentos processuais, e 53 acessos antecipados, o que indica mais de uma categorização para alguns itens.

O interesse pelo tópic “*Industry 4.0*” também abrange outras engenharias. Ao realizar uma pesquisa no *WoS* com as palavras-chave mencionadas na metodologia deste estudo, foi possível obter uma relação de publicações das engenharias sem selecionar uma categoria, e, com isso, foi possível gerar a Tabela 3A e Tabela 3B.

Tabela 3A – Publicações das engenharias.

Categoria	Publicações	Porcentagem
Engenharia Elétrica Eletrônica	101.619	62,06 %
Engenharia Multidisciplinar	13.297	8,12 %
Engenharia Industrial	8.940	5,46 %
Engenharia Biomédica	8.352	5,10 %
Engenharia de Manufatura	7.387	4,51 %
Engenharia Civil	6.202	3,79 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Tabela 3B – Publicações das engenharias.

Categoria	Publicações	Porcentagem
Engenharia Mecânica	6.041	3,69 %
Engenharia Química	4.830	2,95 %
Engenharia Ambiental	2.744	1,68 %
Engenharia Aeroespacial	1.526	0,93 %
Engenharia da Marinha	846	0,52 %
Engenharia Naval	673	0,41 %
Engenharia de Petróleo	659	0,40 %
Engenharia Geológica	621	0,38 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Por meio das Tabelas 3A e 3B nota-se que outras engenharias têm se desenvolvido nessa área de investigação. A engenharia elétrica eletrônica lidera em maior quantidade de publicações com 62,06% dos resultados encontrados, e a engenharia química, mesmo com 2,95%, tem identificado a importância do tema assim como as demais, e como disposto no Gráfico 1 tem apresentado um crescimento exponencial.

A automação, é um conceito que desempenha um papel fundamental na indústria 4.0. A aplicação de sistemas de controle avançados, combinados com algoritmos de aprendizado de máquina, permite que as operações sejam realizadas de forma autônoma, reduzindo a intervenção humana e os erros associados. Da mesma forma viabiliza a otimização dos processos, maximizando a eficiência, minimizando desperdícios e reduzindo os custos de produção. De acordo com

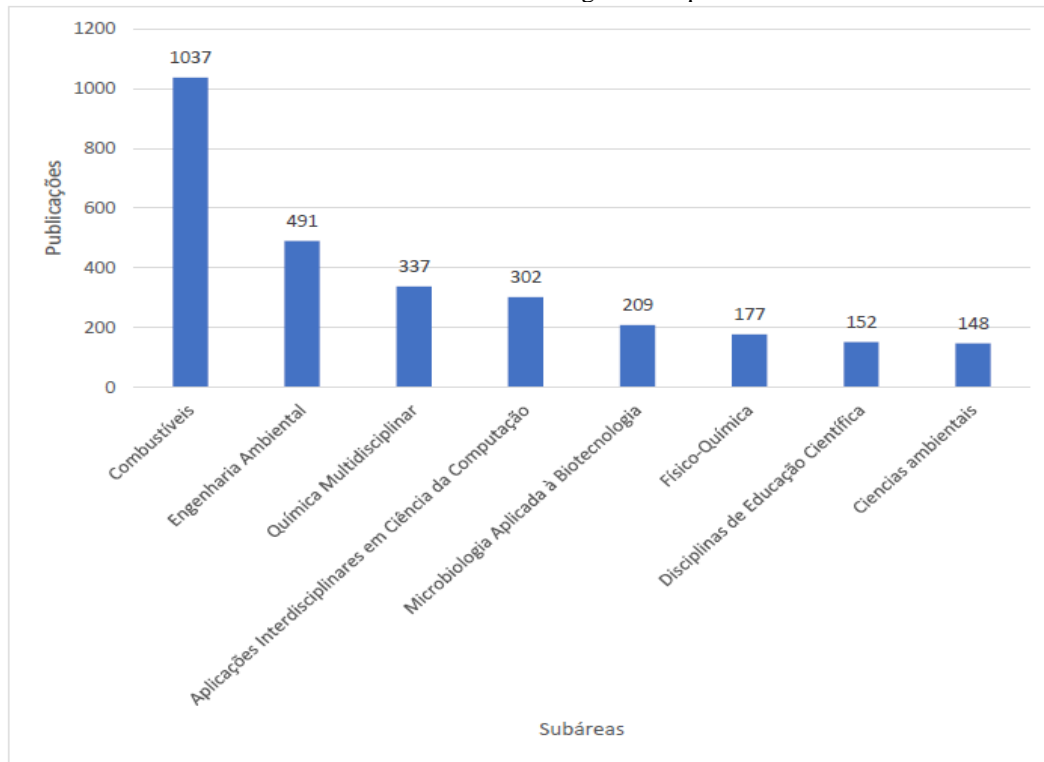
(GILCHRIST, 2016) o custo e tamanho da tecnologia de sensores reduziu drasticamente.

Outro princípio importante é a análise de dados em tempo real, com a capacidade de coletar, processar e analisar grandes volumes de dados em tempo real, a engenharia química pode se beneficiar de uma tomada de decisão mais ágil e eficaz. A análise de dados permite identificar padrões, tendências e possíveis anomalias nos processos, facilitando a detecção precoce de problemas e a implementação de medidas corretivas.

Em resumo, a indústria 4.0 na engenharia química está fundamentada em conceitos como conectividade, automação e análise de dados em tempo real. Esses princípios são essenciais para impulsionar a eficiência, a qualidade e produtividade, abrindo caminho para a criação de uma indústria química mais inteligente e adaptada às demandas do século XXI.

2.3.2 Tecnologias da indústria 4.0 aplicadas à engenharia química

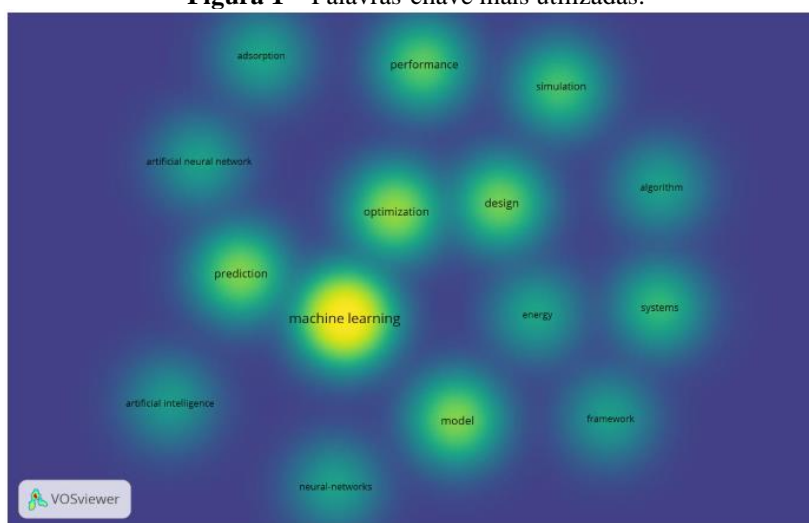
Na era da indústria 4.0, a engenharia química se desdobra em diferentes especializações, cada uma desempenha uma função essencial na transformação digital do setor. A busca realizada por meio do WoS permitiu identificar e apresentar os principais campos de atuação dentro dessa área. No total foram encontrados 44 resultados, contudo foram selecionados os 8 que tiveram uma quantidade maior de publicação dentro do banco de dados da pesquisa realizada. Dentre as diversas especializações da engenharia química a subárea de Combustíveis destaca-se na otimização de processos energéticos, enquanto a Engenharia Ambiental assume um papel crucial com o impacto ambiental. A Química Multidisciplinar, fomenta abordagens integradas, e Aplicações Interdisciplinares em Ciência da Computação aborda a tecnologia para a transformação digital. A Microbiologia aplicada à Biotecnologia, por sua vez, estuda inovações em nível microscópico, enquanto a Físico-Química se dedica ao estudo das propriedades fundamentais da matéria. No campo educacional, a interface entre Disciplinas de Educação Científica e Ciência Ambiental catalisa o desenvolvimento acadêmico sustentável. Os resultados desta busca estão dispostos no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Subáreas da engenharia química.

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Ao explorar essa dinâmica interdisciplinar, a Engenharia Química na Indústria 4.0 revela-se como um campo multifacetado, onde a colaboração entre subáreas é essencial para desbloquear o potencial completo das tecnologias emergentes e impulsionar a inovação na produção industrial.

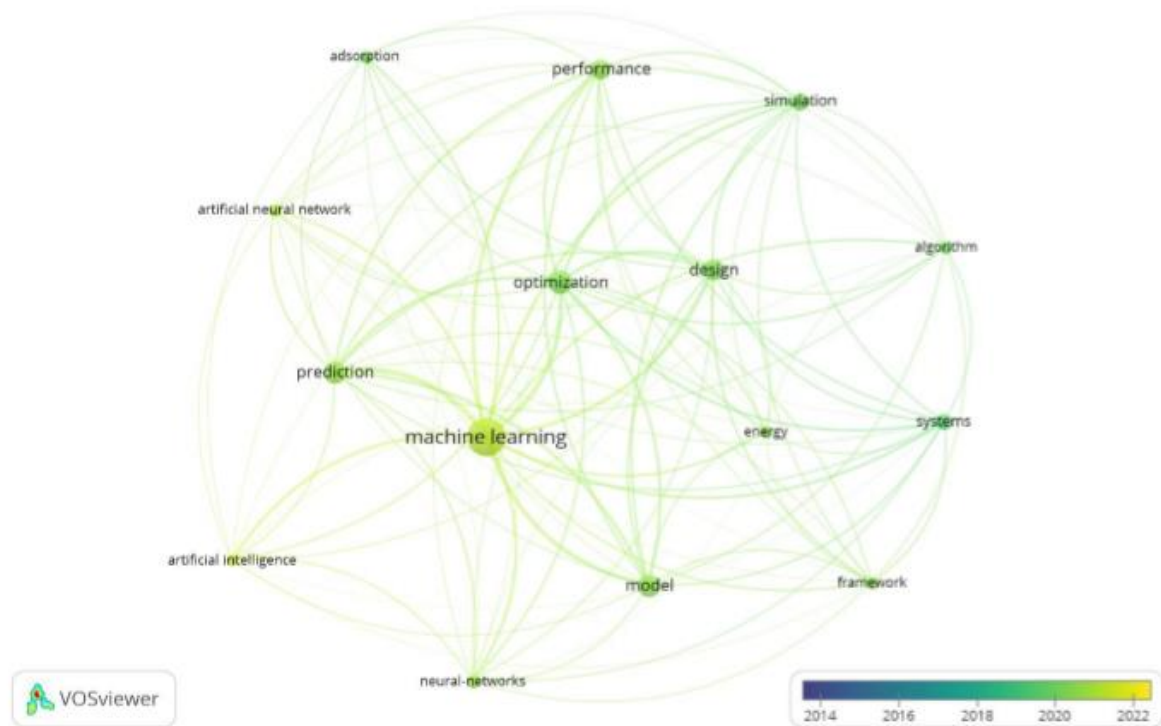
Além das subáreas, outro fator foram as palavras-chave e apesar de as utilizar para delimitar o estudo, o WoS mostrou o conjunto de palavras-chave que mais se repetiram nos documentos encontrados. Por meio do *VOSviewer* foi possível realizar uma exibição, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Palavras-chave mais utilizadas.

Fonte: Resultado da análise realizada pelos autores no *VOSviewer* (2024).

Para selecionar essas palavras, foram utilizados alguns parâmetros. O primeiro é que a palavra-chave deveria ter o mínimo de 50 ocorrências nos documentos encontrados. Após isso, foram selecionadas as 18 palavras com maior quantidade de repetições, sendo excluídas 3 que eram variações de singular ou plural do mesmo termo e mantendo aquelas que tinham mais publicações, restando, ao final, 15 palavras-chave. A Figura 1, extraída do *VOSviewer*, está sendo exibida no modo de “*density*”, uma opção do próprio software, onde a quantidade de publicação é proporcional à intensidade da cor ao redor da palavra, ou seja, quanto mais forte a cor mais publicações foram realizadas utilizando o termo.

Na Figura 2, com os mesmos parâmetros utilizados para obter a Figura 1, temos a relação das palavras-chave.

Figura 2 – Conexão entre as palavras-chave.

Fonte: Resultado da análise realizada pelos autores no *VOSviewer* (2024).

Por meio da Figura 2 é possível notar que as publicações se intensificam a partir de 2019 e aumentam até 2022, o qual foi o ano limite estabelecido. As conexões entre as palavras mostram que elas se interligam, e revelam que há vários estudos que as utilizam como parâmetros de pesquisas, além de que são temas relevantes dentro para a indústria 4.0 na engenharia química, dentro dos critérios estabelecidos na pesquisa realizada no banco de dados.

Para uma compreensão aprofundada do tema, são apresentados estudos que exploram três termos destacados na Figura 2. Esses termos foram selecionados de anos distintos os quais se destacaram na quantidade em que foram citadas, sendo estes 2019, 2020 e 2022, representando nesta ordem, simulação, *machine learning* e inteligência artificial.

2.3.3 Simulação

Na indústria 4.0, a simulação não se limita à replicação de cenários, ela se adapta em tempo real às variáveis do ambiente industrial. Isso não apenas otimiza a eficiência operacional, reduzindo custos e tempo de produção, mas também aprimora a tomada de decisões, permitindo uma resposta ágil a mudanças imprevistas. Segundo o (BRUCKNER et al., 2020) a simulação é vista como uma tendência tecnológica importante e um impulsionador de inovação cada vez mais

crucial para diferentes indústrias, sejam elas de produtos ou processos. Ao capacitar engenheiros químicos a explorar virtualmente diversas abordagens e cenários, a simulação na indústria 4.0 não apenas antecipa desafios, mas se torna uma ferramenta muito importante no desenvolvimento de processos industriais mais inteligentes, eficazes e adaptáveis.

Dentre as várias publicações relacionadas com a simulação, temos um estudo que foi realizado por (KOULOURIS; MISAILIDIS; PETRIDES, 2021) o qual tinha como objetivo pesquisar modelos de processos para simulação e programação de produção na fabricação de ingredientes e produtos alimentícios. O estudo mencionou alguns simuladores projetados principalmente com processos contínuos para indústrias petroquímicas e outras indústrias químicas como: Aspen Plus e Aspen HYSYS da Aspen Technology, Inc. Houston, TX, EUA); UniSim Design da Honeywell (Charlotte, NC, EUA); ProSimPlus da ProSimSA (Labege, França); e PRO/II da AVEVA Group plc (Cambridge, Reino Unido). E em sua análise os autores realizaram um estudo de caso com o software que realizou uma simulação do processo estudado e com isso era possível avaliar formas de otimizar, identificar melhorias estruturais, assim como a viabilidade financeira.

Uma outra publicação realizada por (DE TOMMASO et al., 2020) teve como objetivo conduzir um estudo de métodos experimentais em engenharia química para simulação de processos e por meio deste discutiu sobre como a simulação vai além de resolver equações matemáticas para caracterizar reatores, trocadores de calor e outras operações unitárias, e que por meio dela é possível projetar, e estimar o custo da planta e de equipamentos.

2.3.4 Machine Learning

O *machine learning*, ou aprendizado de máquina, é uma tecnologia que tem se mostrado promissora na engenharia química. Por meio de algoritmos avançados, os sistemas de aprendizado de máquina são capazes de analisar grandes volumes de dados e identificar padrões e tendências ocultas. “Consistem em modelos estatísticos e matemáticos que aprendem com experiências anteriores e descobrem padrões e relações nos dados sem serem explicitamente programados” (BRACCONI, 2022). Essa capacidade permite otimizar os processos químicos, prever falhas, melhorar a qualidade dos produtos e otimizar a eficiência energética.

As tecnologias aprimoradas digitalmente estão definidas para transformar todos os aspectos da fabricação.

Redes de sensores que computam na borda (agilizando o fluxo de informações de dispositivos e fornecendo análise de dados locais em tempo real) e tecnologias emergentes

de análise de elementos finitos em nuvem, produzem dados em escalas sem precedentes, tanto em termos de volume quanto de precisão, fornecendo informações sobre processos complexos e sistemas que antes eram impraticáveis (YANG et al., 2022).

A análise de dados em tempo real é uma tecnologia essencial na indústria 4.0 para a engenharia química. Com a disponibilidade de ferramentas e plataformas de análise avançada, é possível processar e interpretar grandes quantidades de dados de forma rápida e eficiente. A análise em tempo real permite identificar problemas instantaneamente, realizar ajustes imediatos nos processos e melhorar a tomada de decisões, resultando em maior eficiência operacional e qualidade dos produtos.

Dentre as várias publicações relacionadas com *machine learning*, temos alguns estudos que mostram a aplicação da tecnologia. Um desses estudos foi realizado por (BRACCONI, 2022) com o objetivo de intensificar o uso de reatores catalíticos para realizar produções mais sustentáveis. Nesse estudo o autor utiliza o *machine learning* para mapear a entrada e saída, e classificar dados ou modelos de regressão com o objetivo de realizar previsões. Algumas das previsões são relacionadas com as aplicações em catálise, operação, controle dinâmico do sistema, falhas, e monitoramento do processo. Com o modelo devidamente treinado com os dados, essa tecnologia será capaz de ajudar identificar novas estruturas, e assim gerar um ciclo de feedback automático, e com isso é possível reduzir custos de computação e colocar informações detalhadas nas simulações numéricas desde o começo do design do reator.

Um outro estudo realizado por (ÇITMACI et al., 2022) teve como objetivo utilizar um reator eletroquímico para reduzir a concentração de CO_2 . Nesse trabalho o autor utiliza um espectrômetro infravermelho com transformada de Fourier para detectar o gás e em conjunto com o *machine learning* integrado ao sistema. Os resultados são calculados por segundo em tempo real, por meio de um *script* em *Python* que foi desenvolvido para que os dados brutos do cromatógrafo gasoso que detectava os sinais do gás estudado e assim obter a sua concentração ao longo da análise e assim identificar a redução da concentração do mesmo com o uso do reator eletroquímico.

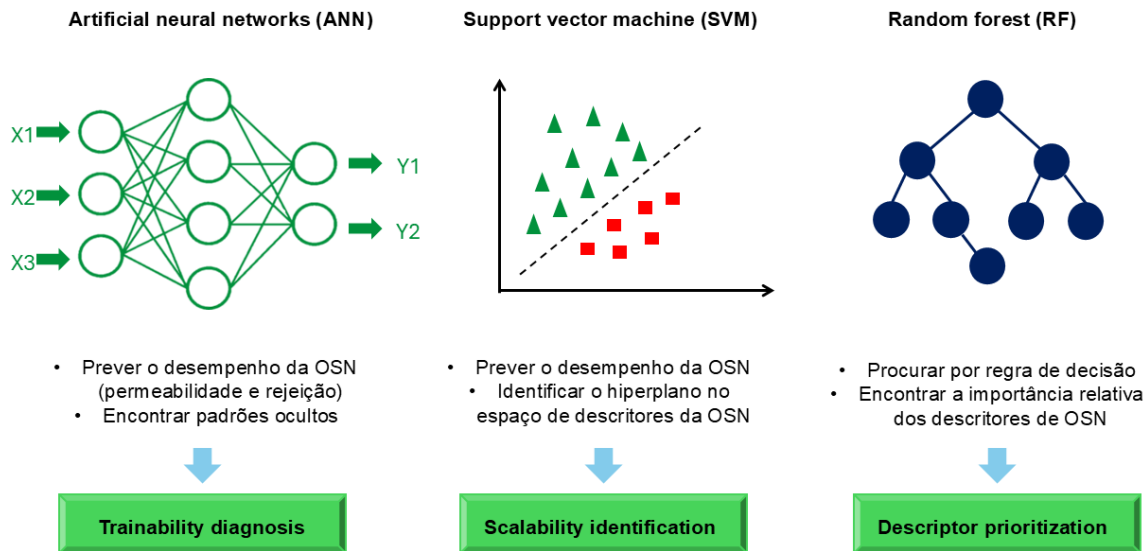
O *machine learning* permite análises em tempo real, aprimorando a precisão, eficiência e confiabilidade na interpretação de dados e na otimização de processos. A quarta revolução industrial tem despertado grande interesse devido ao uso crescente da inteligência artificial, sendo que, como afirmado por (CONRADO; DOS SANTOS RIBEIRO, 2023), o *machine learning* é um dos diversos subconjuntos da inteligência artificial.

2.3.5 Inteligência Artificial

Considerando que a inteligência artificial, assim como *machine learning*, foi utilizada como uma das palavras-chave, abordarei brevemente seu conceito. A integração da indústria 4.0, com seu conjunto de tecnologias avançadas, incluindo a IA, representa um divisor de águas na engenharia química. A IA desempenha um papel fundamental na otimização de processos químicos, permitindo a análise de grandes volumes de dados em tempo real e a tomada de decisões baseadas em algoritmos avançados. Segundo (BRACCONI, 2022) a inteligência artificial representa a capacidade das máquinas realizarem atividades, como a tomada de decisões, que são ligadas ao comportamento de seres inteligentes como os humanos. Essa combinação de IA e engenharia química não apenas impulsiona a eficiência operacional, mas também abre novas fronteiras na pesquisa e no desenvolvimento de materiais e produtos químicos inovadores. Além disso, a IA ajuda a identificar padrões de falhas e a prever manutenções preventivas, aumentando a confiabilidade dos processos. A indústria 4.0 com IA na engenharia química não é apenas uma evolução, é uma revolução que promete melhorias significativas em termos de qualidade, sustentabilidade e inovação na produção de produtos químicos.

Dentre as várias publicações relacionadas com a IA, temos alguns estudos que mostram a aplicação da tecnologia. Um desses estudos foi realizado por (HU, J. et al., 2021) cujo objetivo era utilizar a inteligência artificial para previsão de desempenho de membranas de OSN (nano filtração com solvente orgânico). A inteligência artificial foi utilizada para reduzir a complexidade dos dados, simplificando as informações para treinar os algoritmos utilizados, como ANN (Redes Neurais Artificiais), SVM (Máquinas de Vetores de Suporte) e RF (Florestas Aleatórias). Estes algoritmos foram treinados para prever ou classificar o desempenho da membrana de OSN com base em características específicas. Segue a Figura 3 com a exemplificação dos algoritmos que foram utilizados juntos com a inteligência artificial.

Figura 3 – Algoritmos utilizados pela inteligência artificial para previsão de desempenho da membrana.



Fonte: Adaptado de HU, J. et al. (2021).

Um outro estudo realizado por (HUANG et al., 2023) teve como objetivo realizar uma revisão sobre a aplicação da IA em reatores nucleares, explorando a inteligência artificial, incluindo o aprendizado de máquina e aprendizado profundo, foi aplicada na otimização do design e na manutenção de reatores nucleares. Essas tecnologias são essenciais para lidar com a complexidade dos sistemas, otimizando o design do núcleo, gerenciando o combustível e monitorando condições operacionais online. A IA mostra sucesso em conjuntos de dados limitados, mas aprimorar a leitura de dados complexos e a sua capacidade de generalização é crucial para sua aplicação prática.

2.3.6 Impactos da indústria 4.0.

A adoção da quarta revolução industrial tem impactos significativos na indústria. Um dos indicadores utilizados neste estudo foi a geolocalização, que considera qual o país está realizando mais estudo sobre o tema. No total, foram encontrados 107 países. A Tabela 4 apresenta os 16 países que publicaram mais de 100 documentos. Também considera a colaboração entre os países, o que significa que o mesmo documento pode ser atribuído a mais de um país concomitantemente.

Tabela 4 – Publicações com as palavras-chave por países.

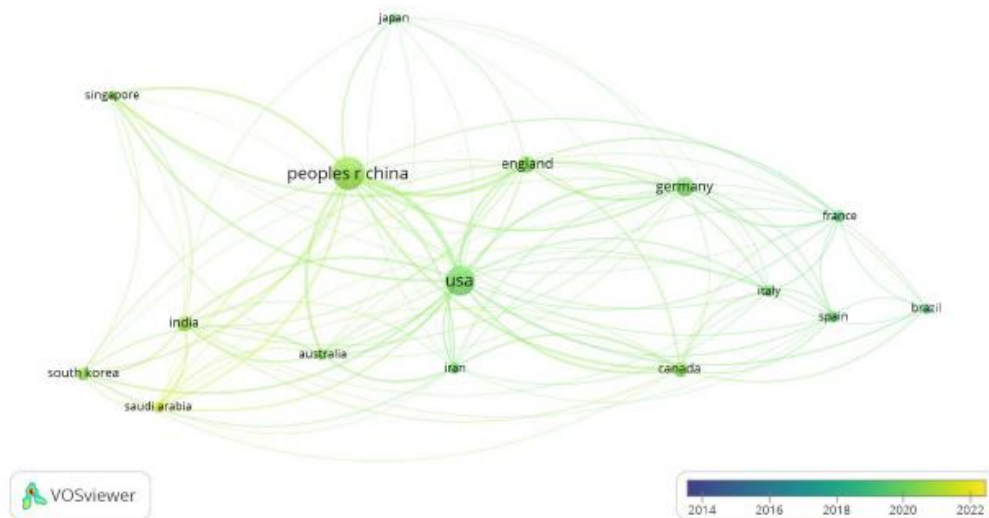
Países	Publicações	Porcentagem
China	1.139	17,15 %
Estados Unidos	975	14,68 %
Alemanha	409	6,16 %
Inglaterra	332	5,00 %
Canada	264	3,98 %
Índia	247	3,72 %
Coreia do sul	197	2,97 %
Irã	168	2,53 %
Espanha	161	2,42 %
Australia	155	2,33 %
Itália	143	2,15 %
França	142	2,14 %
Brasil	125	1,88 %
Arábia Saudita	124	1,87 %
Singapura	117	1,76 %
Japão	102	1,54 %

Fonte: Elaborado pelos autores com os dados da *Web of Science* (2024).

Com a Tabela 4 percebe-se que há países, como a China e o Estados Unidos, que consideram esse tema relevante e possuem uma discrepante quantidade de publicações. De acordo com (SHEVTSOVA; SHVETS; KASATKINA, 2020) a China reduziu a distância entre os líderes mundiais em Research & Development, e construiu muitos centros de pesquisa com ajuda de corporações químicas internacionais.

“A digitalização afeta diretamente os mercados, e as estruturas sociais” (Kagermann, 2014). A utilização de tecnologias avançadas, como automação, internet das coisas e análise de dados, permite uma maior eficiência operacional, resultando em um aumento da produtividade. Os sistemas automatizados e conectados permitem a otimização dos fluxos de trabalho, reduzindo tempos de espera, minimizando erros e maximizando a utilização dos recursos.

A Figura 4 ilustra um diagrama gerado por meio do programa *VOSviewer*, com as redes de colaboração entre os 16 países com mais de 100 publicações, como indicado no banco de dados. Cada círculo representa uma nação, sendo o diâmetro do círculo proporcional à quantidade de documentos publicados pelo respectivo país. As linhas interligando os círculos simbolizam as colaborações entre esses países, onde os documentos publicados tiveram colaboração entre os autores, associados a instituições localizadas em seu respectivo país. A espessura dessas linhas indica o grau de conexão entre os países, proporcionando uma representação visual da intensidade das colaborações na pesquisa científica.

Figura 4 – Colaboração entre os países.

Fonte: Resultado da análise realizada pelos autores no *VOSviewer* (2024).

Por meio da Figura 4 é possível perceber que as publicações começaram a gerar uma quantidade relevante entre 2019 e 2020, onde a maior parte dos países estão com a cor verde e se aproximando ao amarelo. Outro fator importante é que a maioria dos países selecionados possuem conexão entre si, e os países com maior quantidade de conexões são, da mesma, forma os com mais publicações, sendo estes a China e os EUA com, respectivamente, 1.139 e 975 publicações como indicado na Tabela 4.

Além disso, o estudo sobre a indústria 4.0 tem aumentado e consequentemente diversos benefícios têm sido obtidos. Por exemplo, por meio do monitoramento inteligente e em tempo real, é possível identificar pontos de consumo excessivo de energia e implementar estratégias para redução do consumo, como o ajuste de parâmetros operacionais e a otimização dos processos. Isso resulta em uma utilização mais sustentável dos recursos energéticos, reduzindo os impactos ambientais associados à produção química.

“No que diz respeito à sustentabilidade, a indústria 4.0 possibilita a implementação de práticas mais sustentáveis na indústria química. No mundo de hoje, há uma tendência para a síntese e fabricação de produtos químicos mais limpos, seguros, econômicos e conscientes” (NEYT e RILEY, 2021). O acesso a dados em tempo real e a capacidade de análise avançada permitem uma melhor monitorização dos impactos ambientais dos processos, auxiliando na identificação de oportunidades de melhoria e na implementação de medidas para redução do desperdício e da

emissão de poluentes. Além disso, a utilização de tecnologias como a análise de ciclo de vida e a simulação virtual pode contribuir para o desenvolvimento de produtos químicos mais sustentáveis, desde a fase de projeto até a produção e descarte adequado.

Pensando em benefícios e desafios, foi possível montar o Quadro 1 para explorar os dois lados. Por meio do Quadro 1 nota-se que temos grandes benefícios alcançados com os estudos que temos até o limite do tempo do estudo, que foi 2022. A quantidade de estudo na engenharia química tem aumentado exponencialmente, e, assim, ainda há muitos benefícios a serem descobertos. O Quadro 1 também mostra alguns desafios, pois com uma inovação vem a necessidade de se adaptar e se desenvolver para desempenhá-las.

Quadro 1 – Benefícios e desafios da indústria 4.0.

BENEFÍCIOS	DESAFIOS
Maior integração de processos	Compreender e promover a combinação certa de competências e habilidades
Melhoria no fluxo de dados	Necessidade da melhoria de competências e da requalificação dos trabalhadores
Flexibilidade de adaptação a um ambiente de rápida mudança	Perda de empregos
Redução no desperdício, consumo dos materiais, energia e custos	Ciber-segurança

Fonte: Adaptado de TEIXEIRA; TAVARES-LEHMANN (2022).

3 Considerações Finais

Neste estudo entre a Indústria 4.0 e a Engenharia Química, fica claro que estamos no meio de uma grande mudança. A observação do aumento exponencial nas publicações científicas revela a crescente relevância e interesse global no tema estudado. Não é apenas uma, mas várias engenharias que têm realizado pesquisas sobre as possibilidades da Indústria 4.0, demonstrando uma colaboração interdisciplinar.

Ao explorar esse cenário, percebemos que várias áreas da Engenharia Química têm relevante envolvimento na pesquisa e aplicação da Indústria 4.0. Isso está acontecendo em todo o mundo, com países economicamente fortes liderando o caminho. Eles estão investindo pesado em estudos sobre o assunto e, da forma interessante, estão se unindo internacionalmente para enfrentar os desafios dessa nova era industrial.

Apesar dos desafios que a Indústria 4.0 traz, como questões de segurança e ajustes nas

operações, os benefícios são enormes. Aspectos como otimização de processos, economia de energia, sustentabilidade e colaboração global são promessas que podem realmente mudar para melhor o futuro da Engenharia Química.

Referências

- BRACCONI, Mauro. Intensification of catalytic reactors: a synergic effort of multiscale modeling, machine learning and additive manufacturing. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, v. 181, p. 109148, 2022.
- BRUCKNER, Linus et al. The current and future use of simulation in discrete and process industries. **Siemens AG**, 2020.
- CANCINO, Christian A. et al. A bibliometric analysis of supply chain analytical techniques published in Computers & Industrial Engineering. **Computers & Industrial Engineering**, v. 137, p. 106015, 2019.
- CIFFOLILLI, Andrea; MUSCIO, Alessandro. Industry 4.0: national and regional comparative advantages in key enabling technologies. **European Planning Studies**, v. 26, n. 12, p. 2323-2343, 2018.
- ÇITMACI, Berkay et al. Machine learning-based ethylene concentration estimation, real-time optimization and feedback control of an experimental electrochemical reactor. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 185, p. 87-107, 2022.
- CONRADO, Victoria Almeida; DOS SANTOS RIBEIRO, Mariléa Gomes. Elaboração da interpretação automática de fraturas nos perfis de imagem utilizando a Inteligência Artificial. **Latin American Journal of Energy Research**, v. 10, n. 2, p. 13-22, 2023.
- DENN, Morton. **Chemical engineering: An introduction**. Cambridge University Press, 2011.
- DE TOMMASO, Jacopo et al. Experimental methods in chemical engineering: Process simulation. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 98, n. 11, p. 2301-2320, 2020.
- FUCHS, Christian. Industry 4.0: the digital German ideology. **Triplec: Communication, Capitalism & Critique**, v. 16, n. 1, p. 280-289, 2018.
- GILCHRIST, Alasdair. **Industry 4.0**. Apress, 2016.
- HU, Jiahui et al. Artificial intelligence for performance prediction of organic solvent nanofiltration membranes. **Journal of Membrane Science**, v. 619, p. 118513, 2021.
- KAGERMANN, Henning. Change through digitization—Value creation in the age of Industry 4.0. In: **Management of permanent change**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

HUANG, Qingyu et al. A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: Where we are and what's next. **Heliyon**, v. 9, n. 3, 2023.

KOULOURIS, Alexandros; MISAILIDIS, Nikiforos; PETRIDES, Demetri. Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products. **Food and Bioproducts Processing**, v. 126, p. 317-333, 2021.

LEE, Jay. Smart factory systems. **Informatik-Spektrum**, v. 38, n. 3, p. 230-235, 2015.

LEPORE, Dominique; SPIGARELLI, Francesca. Integrating Industry 4.0 plans into regional innovation strategies. **Local Economy**, v. 35, n. 5, p. 496-510, 2020.

MADSEN, Dag Øivind. The emergence and rise of Industry 4.0 viewed through the lens of management fashion theory. **Administrative Sciences**, v. 9, n. 3, p. 71, 2019.

MAJSTOROVIC, Vidosav D.; MITROVIC, Radivoje. Industry 4.0 programs worldwide. In: **Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing: AMP 2019 4**. Springer International Publishing, 2019.

MODAK, Nikunja M. et al. Fifty years of Transportation Research journals: A bibliometric overview. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 120, p. 188-223, 2019.

NEYT, Nicole C.; RILEY, Darren L. Application of reactor engineering concepts in continuous flow chemistry: a review. **Reaction Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 8, p. 1295-1326, 2021.

POWELL, Sean K. et al. Past, present, and future of soft-tissue prosthetics: advanced polymers and advanced manufacturing. **Advanced Materials**, v. 32, n. 42, p. 2001122, 2020.

SEO, Min-Ho et al. Geometrically structured nanomaterials for nanosensors, NEMS, and nanosieves. **Advanced Materials**, v. 32, n. 35, p. 1907082, 2020.

SHEVTSOVA, Hanna; SHVETS, Nataliia; KASATKINA, Maryna. 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)**. IEEE, 2020.

ŚLUSARCZYK, Beata. Industry 4.0: Are we ready?. **Polish Journal of Management Studies**, v. 17, 2018.

TEIXEIRA, Josélia Elvira; TAVARES-LEHMANN, Ana Teresa CP. Industry 4.0 in the European union: Policies and national strategies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 180, p. 121664, 2022.

THEBELT, Alexander et al. Maximizing information from chemical engineering data sets: Applications to machine learning. **Chemical Engineering Science**, v. 252, p. 117469, 2022.

VENKATASUBRAMANIAN, Venkat. The promise of artificial intelligence in chemical engineering: Is it here, finally?. **AIChE Journal**, v. 65, n. 1, 2019.

YANG, Xiao et al. Digitally-enhanced lubricant evaluation scheme for hot stamping applications. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 5748, 2022.

YUE, Liang et al. Single-vat single-cure grayscale digital light processing 3D printing of materials with large property difference and high stretchability. **Nature communications**, v. 14, n. 1, p. 1251, 2023.