



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

YSRAEL SIMÕES LINS DE OLIVEIRA

**INDÚSTRIA QUÍMICA 4.0 EM PERSPECTIVAS E APLICAÇÕES:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

João Pessoa - PB

2020

YSRAEL SIMÕES LINS DE OLIVEIRA

**INDÚSTRIA QUÍMICA 4.0 EM PERSPECTIVAS E APLICAÇÕES:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientador: Prof. Flávio Luiz Honorato da Silva.

João Pessoa - PB

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

O48i Oliveira, Ysrael Simões Lins de.
Indústria Química 4.0 em Perspectivas e Aplicações: uma
Revisão da Literatura / Ysrael Simões Lins de Oliveira.
- João Pessoa, 2020.
45 f. : il.

Orientação: Flávio Luiz Honorato da Silva.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Fábricas inteligentes. 2. Sistemas ciberfísicos. 3.
Processos industriais. I. Silva, Flávio Luiz Honorato
da. II. Título.

UFPB/BS/CT

CDU 66.01(043.2)

YSRAEL SIMÕES LINS DE OLIVEIRA

**INDÚSTRIA QUÍMICA 4.0 EM PERSPECTIVAS E APLICAÇÕES:
UMA REVISÃO DA LITERATURA**

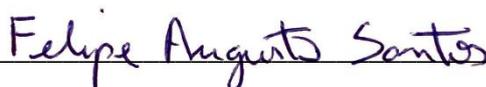
Trabalho Final de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal da Paraíba como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.



Prof. Dr Flávio Luiz Honorato da Silva– DEQ/CT/UFPB
(Orientador)



Prof. Dra Sharline Florentino de Melo Santos– DEQ/CT/UFPB
(Examinadora)



Engenheiro Felipe Augusto Santos– DEQ/CT/UFPB
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de agradecer a Deus. Ele me criou e fez a Engenharia Química, bem como tudo o que existe. Mesmo com a minha rebeldia, me amou e enviou graciosamente o Seu Filho para morrer em meu lugar, para salvação de todo aquele que crê na morte e ressurreição de Jesus. Glórias a Ele por cada batalha sofrida e vencida durante este curso!

Gostaria de agradecer também a meus pais, Joel Jorge de Oliveira Filho e Izaura Simões Lins de Oliveira, por todo o amor e carinho em cada minuto desde que passei a existir no ventre da minha mãe. Me ensinaram o Caminho a ser seguido e me deram preciosos conselhos, em cada momento da minha vida. Amo vocês!

Agradeço ainda a minha irmã, Keilla Rebecka Simões de Oliveira Freitas, amiga para todas as horas, conselheira a cada momento e com quem aprendo muito a cada dia; o meu cunhado, José Rodolfo Pereira de Freitas, por ser um amigo sempre presente e cuidar tão bem da minha irmã.

Agradeço especialmente a Taís Soares Ramos, minha namorada, que muito amo e com quem quero passar cada dia da minha vida. Obrigado por todo apoio, amor!

Agradeço aos meus avós paternos, Joel Jorge de Oliveira (*in memoriam*) e Idalice Leite Montenegro, e maternos, Euclides Lins Pessoa da Costa (*in memoriam*) e Zilda Simões Lins, os quais muito amo e pareço. Obrigado por cada conversa e cada momento de apoio. Como foi e é precioso cada momento junto com vocês!

A cada familiar: tio, primo, amigo, meu muito obrigado! Deus abençoe vocês!

O curso me proporcionou muitas amizades com pessoas incríveis. Obrigado Alysson, Ellen, Yasmin, Paula e Paloma por tantos gargalos de processo enfrentados juntos! Que Deus os abençoe grandemente, contem sempre comigo!

Tive também mestres marcantes, com ótimas aulas e exemplos de vida. Agradeço ao professor Flávio Luiz Honorato da Silva, meu orientador e amigo desde 2016. Muito aprendi com o senhor, que Deus o abençoe muito! Destaco ainda de forma especial o professor Alfredo Curbelo (de aulas incríveis), a professora Sharline Florentino (de gentileza e iniciativa fantásticas), o professor Genaro (sempre disposto a ajudar), a professora Lígia Dias (com um forte exemplo de dedicação e esmero) e a professora Ana Flávia. Agradeço ainda a cada mestre por cada aula tida e ensinamento prestado!

O curso também me foi de experiências marcantes. Não poderia deixar de registrar meu agradecimento à Projeq, empresa júnior de Engenharia Química e Química Industrial da UFPB, onde pude desenvolver minhas habilidades empreendedoras e conhecer membros incríveis. Desejo muito sucesso a cada um!

Agradeço também a oportunidade de fazer o intercâmbio em Portugal. Aprendi muito sobre a Engenharia Química e mudei minha visão de mundo após aqueles meses ali, voltando diferente. Obrigado engenheiros Gilberto Pinto, Paula Neto e Ana Carneiro, e amigos Luís, João, Flávia e Alzira, assim como toda a Igreja Batista de Cedofeita, que tão bem me receberam. Espero poder reencontrá-los em breve!

Sou muito grato também aos meus amigos e irmãos aqui no Brasil, os quais muito me fortaleceram e ajudaram na caminhada. Valeu Ícaro, Vaso, Simão, Lacerda, Guga, Melo, Maisel e tantos outros que são amizades tão importantes para mim, assim como a Igreja Evangélica Batista de João Pessoa, que muito amo e onde tenho prazer de servir. Obrigado por tudo!

RESUMO

Tecnologias recentes disruptivas, como a internet das coisas, a inteligência artificial e a computação em nuvem têm conduzido a uma quarta revolução industrial, formatando a denominada indústria 4.0, que tem como marco a fusão entre os ambientes virtual e real. Normalmente esta é associada à indústria manufatureira, não sendo aplicada com a mesma intensidade à indústria química. Desse modo, este trabalho teve como objetivo definir o que seria uma fábrica química inteligente e verificar as perspectivas principais de aplicações da revolução 4.0 para a indústria química. A partir de uma revisão da literatura, foram selecionados 28 artigos com tais aplicações, constatando-se que estas se dão principalmente nas áreas de controle e gestão do processo, aplicação dos dados obtidos e segurança das operações. A implantação de novas tecnologias para a indústria química não se trata apenas de uma questão de viabilidade econômica para as empresas, mas também de estratégia nacional para o desenvolvimento sustentável de cada país.

Palavras-chave: Fábricas inteligentes; Sistemas ciberfísicos; Processos industriais.

ABSTRACT

Recent disruptive technologies, as internet of things (IoT), artificial intelligence and cloud computing, are leading to a fourth industrial revolution, shaping the known Industry 4.0, characterized by the fusion between real and virtual worlds. Frequently it is associated with the manufacturing industry, though not being applied with the same intensity to the chemical industry. In this way, this work aimed to define what is supposed to be a smart chemical industry and verify the main perspectives of the 4.0 revolution application to this industry. From a literature review, 28 articles were selected with these applications, noticing that they are mainly related to the process control and management, application of obtained data and operations safety. The implantation of new technologies to the chemical industry is not only a matter of economic viability, but of national strategy for the sustainable development of each country.

Key-words: Smart factories; Ciberphysical systems; Industrial processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motivos de exclusão dos artigos não incluídos na pesquisa.....	23
Figura 2 - Principais áreas de aplicações dos artigos incluídos da pesquisa.....	24

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo geral.....	12
2.2. Objetivos específicos.....	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1. Indústria 4.0.....	13
3.1.1. Inteligência artificial.....	14
3.1.2. Computação em nuvem.....	15
3.1.3. Internet das coisas.....	15
3.1.4. Sistemas ciberfísicos.....	16
3.1.5. Big Data.....	16
3.1.6. Outras tecnologias.....	17
3.2. Indústria química.....	18
4. METODOLOGIA.....	19
4.1. Pesquisa exploratória descritiva.....	19
4.2. Critérios de inclusão.....	19
4.3. Critérios de exclusão.....	19
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1. Fábricas químicas inteligentes.....	20
5.2. Aplicações da Indústria 4.0.....	22
5.2.1. Controle e gestão do processo.....	24
5.2.2. Dados.....	28
5.2.3. Segurança do processo.....	30
5.2.4. Desenvolvimento de produto.....	31
5.2.5. Simulação.....	32
5.2.6. Materiais.....	32
5.2.7. Gestão energética.....	33
5.2.8. Manutenção.....	33
5.2.9. Implantação de tecnologias 4.0.....	33
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

O cenário atual do mercado industrial está cada vez mais exigente. A preocupação com as causas ambientais, a competitividade internacional e a personalização dos produtos por parte do consumidor têm se tornado requisitos deste. Tais requisitos, porém, acabam por encarecer o custo do processo produtivo e, por muito tempo, necessitaram de tecnologias inacessíveis financeiramente para a implementação, resultando em uma baixa capacidade para atendimento pleno das necessidades, inviabilizando o seu atendimento (SACOMANO et al., 2018).

Contudo, as novas tecnologias disponíveis no passado recente têm aberto novas oportunidades. Tecnologias como *Internet of Things* (Internet das Coisas), sistemas ciber físicos e computação em nuvem permitem uma melhor integração entre todo o processo produtivo, desde a requisição por parte do consumidor até a linha de produção e entrega a este (HOFMANN; RUSCH, 2017). Assim, deu-se o início ao conceito da Indústria 4.0.

O termo “Indústria 4.0” foi inicialmente apresentado na feira de Hannover, na Alemanha, em 2011, como uma iniciativa de esforço do governo alemão para a promoção da informatização da indústria manufatureira (SUNG, 2018). Assim, representa, de acordo com Lasi et al. (2014), uma remodelação do atual modelo de processo produtivo, no qual o produto controla o seu próprio processo de manufatura e são introduzidos produtos altamente customizáveis mantendo-se, contudo, a produção em massa.

Isto torna-se possível a partir da conexão dos produtos com as máquinas que o produzem por meio da internet, que permite a comunicação entre elas (M2M, do inglês *Machine to Machine*), e dá origem às chamadas *Smart Factories* (em português, fábricas inteligentes).

Para tal, toda a cadeia de geração de valor, desde os níveis comercial, gerencial e produtivo, é afetada, de modo que uma nova arquitetura do negócio se torna necessária. Foi então desenvolvida uma arquitetura modelo denominada *Reference Architecture Model Industrie 4.0* (em português, Modelo de Arquitetura de Referência para Indústria 4.0) ou simplesmente RAMI 4.0, que reúne as perspectivas da integração entre dispositivos de tecnologia da informação, o ciclo de vida do produto e os papéis e responsabilidades na planta industrial para definição de regras de implementação da Indústria 4.0 (CONTRERAS; GARCIA; PASTRANA, 2017).

A implantação da produção 4.0, portanto, apresenta um grande desafio para as empresas, universidades e governos, por reformular o modelo de processo produtivo por completo e demandar uma ampla variedade de competências tecnológicas recentes, muitas vezes ainda indisponíveis no mercado em quantidade suficiente, além da necessidade de adaptar parques industriais já existentes ao modelo 4.0.

Tal implantação, por sua vez, apresenta-se num cenário ainda mais desafiador para as indústrias químicas. Com processos contínuos conduzidos sob elevadas condições das variáveis de processo (como pressão e temperatura), a implantação de sistemas que respondam à customização que a nova revolução propõe para o cliente em termos de tempo e espaço requer o *design* de processos efetivos para uma produção descentralizada de químicos, adaptáveis e flexíveis (SCHLOGL, 2017).

Desse modo, o presente trabalho teve como objetivo investigar os principais desenvolvimentos da produção 4.0 para a indústria química, os avanços já realizados e as perspectivas de desafios futuros.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi verificar o atual estado de arte dos impactos da quarta revolução industrial na indústria química, de forma a verificar o conceito de fábricas químicas inteligentes, bem como perspectivas de aplicações da Indústria 4.0 para as fábricas químicas.

2.2. Objetivos específicos

- Verificar como a literatura define uma fábrica química inteligente;
- Explorar as principais áreas de aplicações existentes para processos químicos quanto à indústria 4.0, bem como as principais áreas a desenvolver.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Indústria 4.0

A indústria constitui um importante setor da atividade econômica gerador de renda e de empregos, produzindo bens materiais a serem utilizados pelo homem. Desde a industrialização, contudo, a introdução de tecnologias que mudaram drasticamente a forma de produção foram posteriormente denominadas “revoluções industriais” (LASI et al., 2014).

Até o momento, são compreendidas quatro revoluções industriais impulsionadas por novas tecnologias: a mecanização do trabalho antes realizado manualmente no final do século XVIII com a criação da máquina a vapor (a primeira revolução industrial), a produção em massa a partir do uso intensivo de energia elétrica na produção na segunda metade do século XIX (a segunda), a automatização da produção com sistemas lógicos programáveis na segunda metade do século XX (a terceira) e a junção dos mundos virtual e real por meio de sistemas ciberfísicos, que se trata da quarta revolução e ocorre atualmente (SLUSARCZYK, 2018).

Assim, a quarta revolução industrial introduziu o conceito de indústria 4.0, que incorpora tecnologias que permitem a comunicação entre as máquinas e os produtos, bem como a integração de toda a cadeia de negócio, no processo produtivo. Segundo Oztemel e Gursev (2020), ela é definida como uma migração de uma manufatura centrada em máquinas para uma manufatura digital.

A produção 4.0 dá-se, então, num cenário no qual tornam-se inteligentes: o *design* (no qual softwares de *design* interagem com sistemas físicos), a produção (na qual objetos inteligentes capturam as necessidades em tempo real para otimização), o monitoramento (a partir de uma grande variedade de sensores que produzem um alto volume de dados sobre o

processo), controle (os dados gerados são processados e geram informações em tempo real), agendamento de produção (há previsão de comportamentos e da qualidade da produção) e aplicações industriais específicas (ZHENG et al., 2018).

Para tal, de acordo com Zhong et al. (2017), a manufatura inteligente depende de certas tecnologias que permitam aos dispositivos e máquinas a comunicação entre si, com a resolução de problemas em tempo real baseados em experiências passadas e na capacidade de sua aprendizagem. Para os autores, dentre estas tecnologias destacam-se a inteligência artificial, a computação em nuvem, a internet das coisas, sistemas ciberfísicos e *Big Data*.

3.1.1. Inteligência artificial

A inteligência artificial é o campo da engenharia e da ciência que desenvolve sistemas que exibem características associadas a inteligência humana, como percepção, solução de problemas complexos, aprendizagem e adaptação, sendo tais sistemas agentes rápidos, objetivos, explícitos e precisos (TECUCI, 2012).

Tecuci (2012) destaca ainda que, para tal, a inteligência artificial usa abordagens e métodos desenvolvidos por seus subcampos, como processamento natural da linguagem, *Machine Learning* (ou aprendizagem de máquina) e robótica, com a aprendizagem de máquina, por exemplo, permitindo a aquisição ou obtenção de conhecimento para o sistema a partir da entrada de dados ou da própria experiência de resolução de problemas do agente.

Desse modo, a inteligência artificial e a aprendizagem de máquina apresentam-se como alguns dos principais habilitadores da colaboração entre máquinas numa rede, como é proposto pela indústria 4.0, permitindo que estas tomem suas próprias decisões e contribuindo para a melhora do processo produtivo ou para garantir a qualidade da produção (GAROFALO et al., 2018).

3.1.2. Computação em nuvem

A computação em nuvem, por sua vez, remete ao método de tornar disponíveis recursos de computação (*software e hardware*) por um provedor, sob demanda do usuário e geralmente pela internet, estando no campo de utilidades computacionais, nas quais o poder de máquina é utilizado como um recurso, que pode ser poder de processamento, espaço de armazenamento, aplicações, entre outros (RAJARAMAN, 2014).

Através dela, recursos de alto custo de implantação podem ser contratados em provedores de tais recursos computacionais, facilitando a aquisição e o poder de máquina das empresas, contribuindo na obtenção de aplicações sem mesmo gerenciar sua complexa infraestrutura (LEITNER et al., 2019).

Assim, a computação em nuvem facilita a criação de ecossistemas de manufatura e a colaboração entre fornecedores e clientes, sendo vista como uma das tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, permitindo o armazenamento de grande volume de dados, o consumo de recursos computacionais baseado na requisição, evitando a necessidade de obtenção de licenças, salvando a necessidade de manutenção dos sistemas e, portanto, energia e ainda permitindo o acesso aos dados de diferentes localidades e pontos geográficos (VELÁSQUEZ; ESTEVEZ; PESADO, 2018).

3.1.3. Internet das coisas

A internet das coisas se refere à infraestrutura de sistemas avançados que permite a interconexão entre coisas (virtuais e reais), com definição ainda baseada nos produtos que se interconectam ou nos protocolos da internet de tais conexões e com inúmeras aplicações, como fábricas inteligentes, cidades inteligentes, soluções de transporte inteligentes e ainda saúde inteligente (WORTMANN; FLUTCHER, 2015).

Englobando a indústria 4.0, desenvolveu-se o termo *Industrial Internet of Things* (IIoT ou internet das coisas industrial), que se refere à aplicação da internet das coisas no ambiente de manufatura no qual as máquinas e os processos se interconectam por meio de sensores e atuadores através da internet, levando à otimização do sistema quanto à gestão da qualidade, eficiência energética e predição de falhas em tempo real (AAZAM; ZEADALLY; HARRAS, 2018) .

3.1.4. Sistemas ciberfísicos

Sistemas ciberfísicos ou *Cyberphysical Systems* (CPS) representam, de acordo com Rojas e Rauch (2019), a evolução de sistemas embarcados de automação da função de apenas obter e transmitir dados do processo por meio de sensores e atuadores para sistemas que interagem com o processo físico, trocando informações precisas sobre o ambiente e sobre o estado em que está, que o permitem, assim, tomar decisões de forma autônoma, aumentando as possibilidades de automação do processo para além do controle feedback.

Assim, o desenvolvimento de sistemas ciberfísicos em sistemas de produção contribui para a formação de fábricas inteligentes, na qual há uma integração completa entre os produtos, máquinas e processos de engenharia e de negócio, aumentando a flexibilidade e eficiência da produção, contribuindo para a formulação de indústrias 4.0 (FRAGA-LAMAS et al., 2016).

3.1.5. Big Data

A obtenção de um alto volume de dados referentes ao processo químico a partir do avanço em desenvolvimentos tecnológicos já discutidos, como a internet das coisas, tem contribuído para o desenvolvimento de técnicas de tratamento e análise de dados para extração de informações valiosas sobre o processo, sendo esta volumosa quantidade de dados

obtida de diversas fontes denominada “*Big Data*” (SANTOS et al., 2017). Mostra-se, assim, uma chave crucial para a inovação sustentável da fábrica 4.0 (LEE; KAO; YANG, 2014).

É importante destacar que a indústria 4.0 não faz uso de tais tecnologias de forma isolada, mas de forma integrada. O desenvolvimento da computação em nuvem, por exemplo, permitiu que mais dados fossem armazenados, tornando disponível por um custo muito mais baixo a posse de um alto volume de dados, o que, por sua vez, desenvolveu o *Big Data*. Da Xu e Duan (2019) investigaram a estreita relação entre *Big Data* e sistemas ciberfísicos, visto que estes continuamente geram um alto volume de dados, cuja análise requer técnicas da ciência dos dados para aumentar a escalabilidade, eficiência e segurança do sistema.

3.1.6. Outras tecnologias

O desenvolvimento de outras tecnologias também tem contribuído para a formulação de fábricas inteligentes, como o *digital twin* e a manufatura aditiva.

O *digital twin* ou gêmeo digital é um modelo virtual altamente fidedigno de objetos físicos, permitindo que as otimizações do design do produto e da manufatura complexa sejam testadas digitalmente, contribuindo para a integração dos ambientes real e virtual (QI et al., 2018). Ele, portanto, reproduz em tempo real, através de sensores, o estado real da operação, além de poder ser usado na idealização do produto ou do processo, contribuindo para a construção de um protótipo mais fidedigno.

Já a manufatura aditiva, também chamada de impressão 3D, consiste na obtenção de produtos por meio da fusão do material e na sua construção por uma camada a cada vez, ao invés de procedimentos tradicionais de moldagem. Permite, assim, a produção de partes complexas com um custo baixo, diminuindo o tempo de desenvolvimento de produtos e habilitando um elevado grau de customização, que é uma das principais marcas da indústria 4.0 (BABU; GOODRIGE, 2015).

3.2. Indústria química

A indústria química é definida como o “complexo de processos, operações e organizações engajadas na manufatura de químicos e de seus derivados” (BRITANNICA, 2020). Desse modo, envolve uma ampla gama de setores, cujos produtos geralmente não estão disponibilizados diretamente ao consumidor final, mas necessitam de mais processamento antes que o sejam.

4. METODOLOGIA

4.1. Pesquisa exploratória descritiva

A investigação de dados deu-se no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas do Nível Superior (CAPES), durante os meses de julho e agosto de 2020. Por ser um tópico recente, não foi necessário delimitar o período dos artigos, usando-se dois termos de buscas: artigos que tenham como palavras-chave “*smart factory*” e “*chemical*”, no sentido de definir o que seria uma indústria química inteligente, e, em seguida, artigos que contenham como palavra-chave “*Industry 4.0*” e que contenha referências a “*chemical industry*”, com o objetivo de verificar na literatura as principais aplicações existentes da Indústria 4.0 na indústria química.

4.2. Critérios de inclusão

Foram selecionados artigos presentes na língua inglesa e portuguesa.

4.3. Critérios de exclusão

Foram excluídos da pesquisa artigos que não contemplavam o assunto.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Fábricas químicas inteligentes

A partir da constatação de que a indústria 4.0 é referida principalmente em relação à indústria manufatureira, torna-se necessário primeiramente verificar o que é uma fábrica química inteligente, nos moldes da Revolução 4.0. A pesquisa dos termos “*smart factory*” e “*chemical*” como assuntos teve como resultado 2 artigos, por ser um assunto recente e ainda pouco explorado.

Ao tratar de uma das principais indústrias químicas, Li (2016) define o que seria uma indústria petroquímica inteligente a partir de duas perspectivas: uma mais generalista, orientada a partir da integração de toda a cadeia de negócio da indústria, conectando dispositivos inteligentes, pessoas e máquinas, e outra mais específica voltada para a produção, na qual sensores, sistemas de controle, *hardware* inteligente, entre outros dispositivos se interconectam numa rede através de sistema ciberfísico (do inglês *cyberphysical system*, ou CPS).

Segundo ele, a construção de uma fábrica inteligente do setor petroquímico, baseada em CPS, deve promover a integração da produção com a gestão, a integração da cadeia de suprimentos e a integração da operação, como o objetivo geral da excelência operacional. Essas e outras variáveis podem ser verificadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais marcas de uma Indústria Petroquímica Inteligente.

Estrutura	Conteúdo
Um objetivo	Excelência operacional
Três linhas principais	Integração de produção e gestão para refino de petróleo e indústrias químicas; Integração da cadeia de suprimentos para a cadeia de valor petroquímica; Integração de design e operação para o ciclo de vida petroquímico
Quatro capacidades chave	Conscientização geral da localização, previsão e início de aviso, otimização colaborativa e decisão científica
Cinco características	Automação, digitalização, visualização, modelagem e integração
Seis domínios do negócio	Integração da gestão da produção e do controle, gestão de ativos, gestão de energia, gestão de HSE, gestão da cadeia de suprimentos e tomada de decisão auxiliar

Fonte: LI (2016).

Rietze et al. (2018) destacam a nova demanda do mercado orientada ao consumidor, com uma demanda crescente por flexibilidade da produção de produtos individualizados, de modo que uma produção modular, caracterizada por módulos de produção que operam de forma contínua e não em linhas únicas de operação, é sugerida principalmente para produção de especialidades químicas, como fármacos.

Assim, a fábrica química inteligente é vista a partir da abordagem da produção modular, na qual deve haver automação e comunicação entre os módulos, prontos para uso, permitindo um sistema automatizado que os reconheça e os integre (RIETZE et al., 2018).

Desse modo, é possível verificar que fábricas químicas inteligentes variam conforme o tipo de produto, que, associadas à Revolução 4.0, possuem diferentes demandas do mercado, todas, contanto, fazendo uso de novas tecnologias para atendimento de tais demandas.

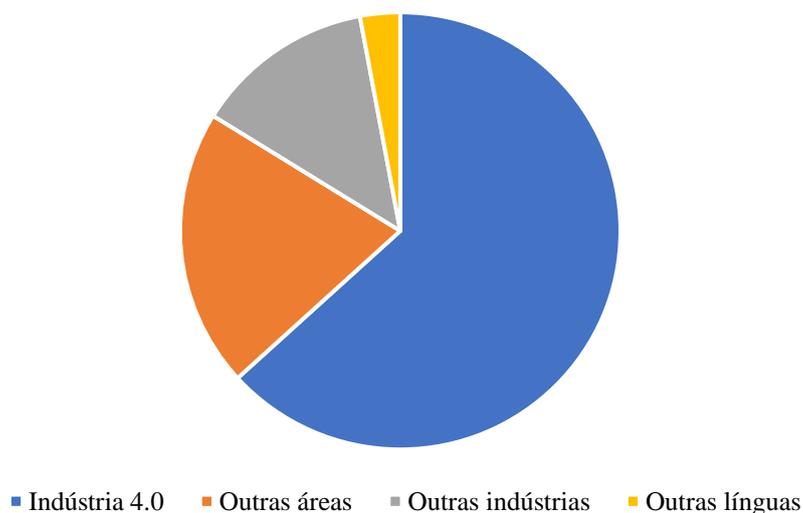
5.2. Aplicações da Indústria 4.0

Em artigo publicado em 2016, a consultoria Deloitte elencou os principais aspectos que a Indústria Química pode receber de aplicações da Indústria 4.0, baseados em duas frentes: otimização da produtividade e do risco das operações, com aplicações nas áreas de gestão de manutenção preditiva, controle e gestão do processo, gestão energética, gestão da segurança, simulação de processos, visibilidade da cadeia de valor e previsão de demanda, e crescimento do negócio em termos de receita, com aplicações nas áreas de manufatura aditiva para novos produtos, análise avançada para seleção de materiais, impressão 4D para desenvolvimentos de materiais avançados e integração de dados para aumento da receita da empresa (DELOITTE, 2016).

Desde então, muitas aplicações têm sido desenvolvidas, principalmente com o desafio de serem integradas às fábricas já existentes até o ponto de poderem ser consideradas “fábricas inteligentes”.

A partir da pesquisa da palavra-chave “*Industry 4.0*” e estando relacionado ao termo “*chemical industry*”, foram encontrados 96 artigos na literatura sobre a indústria química 4.0, com foco primário em suas aplicações. Dos artigos encontrados, 68 foram excluídos por não estarem de acordo com o tema proposto ou por estar presente em outras línguas, como apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Motivos de exclusão dos artigos não incluídos na pesquisa.



A grande maioria dos artigos desconsiderados na pesquisa (63,2%) teve como motivo de exclusão o fato de abordar temas gerais da Indústria 4.0, não tratando de aplicações específicas da indústria química. Uma parcela considerável (20,6%), por sua vez, foi descartada por ser referente a outras áreas, como Agricultura e Odontologia, embora tais áreas façam uso de químicos e englobem a Revolução 4.0 num sentido mais amplo. Outra parcela considerável (13,2%) não foi utilizada por trabalhar aplicações 4.0 para processos físicos em indústrias que fazem pouco ou nenhum uso de processos químicos, como a automobilística. Uma pequena quantidade de artigos (3,0%) foi descartada por estar em outros idiomas, apesar de ter o resumo em inglês.

Por sua vez, os artigos englobados na pesquisa envolveram diversas aplicações 4.0 para a indústria química, destacando-se nas áreas de: Controle e gestão do processo (46,4%), Integração de dados ao processo (17,8%), Segurança do processo (7,1%), Desenvolvimento de produtos (3,6%), Simulação (3,6%), Seleção de materiais (3,6%), Gestão energética (3,6%), Manutenção (3,6%) e Implantação de aplicações 4.0 (10,7%). A Figura 2 mostra a distribuição dos artigos incluídos na pesquisa por área de aplicação.

Figura 2 - Principais áreas de aplicações dos artigos incluídos da pesquisa.



Desse modo, a partir das aplicações citadas pela consultoria Deloitte, verifica-se que grande parte das aplicações voltadas para a indústria química se refere ao controle e a gestão do processo, com grande ênfase também no uso de dados a partir de tecnologias emergentes e voltadas para a segurança do processo. Poucas aplicações, porém, relevantes foram encontradas quanto ao desenvolvimento de produto, à simulação do processo, ao desenvolvimento de novos materiais, à gestão energética da planta química e ao plano de manutenção da mesma.

5.2.1. Controle e gestão do processo

Eisen et al. (2020) observam a indústria química 4.0 a partir de sua digitalização; para os autores, apesar da indústria 4.0 ser mais citada para a indústria manufatureira, os ganhos possíveis de serem obtidos com sua implementação na indústria química e o papel que esta exerce para a economia de muitos países não podem ser negligenciados.

Para tal, propõem uma integração e automação do controle de qualidade em todo o processo produtivo (desde a matéria-prima, produção até a venda do produto), na nuvem. As variáveis do processo devem então ser controladas em linha, em tempo real, para que

possíveis desvios possam ser corrigidos antes que seja necessária a rejeição de produtos por desvios do processo, além de amostras de calibração também permitirem uma auto calibração das máquinas. Assim, a análise do processo com ferramentas digitais poderá conduzir a uma maior produtividade e segurança da planta.

Eifert et al. (2020), ao continuarem o trabalho desenvolvido conjuntamente com Eisen, destacam o papel vital na Indústria 4.0 da integração de sensores inteligentes. Estes atuam em duas vertentes: a partir de uma coleta de dados do processo real no *physical twin* (ou gêmeo físico) e pelo processamento de tais dados no *digital twin* (ou gêmeo digital), que, a partir de algoritmos de Inteligência Artificial, processa os dados, obtendo condições ótimas de operação e atuando automaticamente na operação real.

Tais sensores, segundo eles, são de importante destaque na construção dos sistemas ciberfísicos e encaram desafios modernos, tais como matérias-primas de origem biológica que necessitam de um controle de qualidade ainda maior (em virtude da necessidade de mais etapas de processamento para obtenção do produto desejado) e a segurança dos dados gerados. Suas contribuições principais são principalmente no controle e otimização do processo, bem como no uso dos *digital twins* para o design baseado em modelos, reduzindo a necessidade por experimentos (EIFERT et al., 2020).

Fabris et al. (2020) aplicam o controle 4.0 do processo em uma indústria baseada em algas. Os problemas relacionados à falta de áreas cultiváveis e crescimento populacional têm levado ao desenvolvimento industrial de produtos, como comida, químicos a granel e bioplásticos a partir de microalgas, com baixo custo associado. Assim, a aplicação de internet das coisas permite controle em tempo real do cultivo, do sistema de colheita, do crescimento e da produtividade das algas, além do *digital twin* permitir realizar previsões para ajuste das operações.

Bowler et al. (2020a) discutem a importância do processo de agitação e mistura para a indústria química, necessário para processos de transferência de massa, aeração e suspensão de sólidos, e fazem uma revisão da literatura das principais técnicas para mensurar a operação, contribuindo cientificamente para uma posterior elaboração de sensores. Isto mostra os desafios para este tipo de indústria mediante a variabilidade da sua produção e aplicações futuras a serem desenvolvidas pelo mercado, para o monitoramento na linha da operação.

Bowler, em outro artigo com colaboradores, desenvolveu um sensor ultrassônico para controle da mistura, o qual usa algoritmos de *Machine Learning* para o processamento e interpretação dos sinais obtidos, prevendo em tempo real o tempo necessário para a finalização da operação com acuracidade de até 96,3% (BOWLER et al., 2020b).

Grassi et al. (2020) fizeram uso de micro sensores infravermelho para controle em tempo real dos parâmetros de cinzas, umidade, conteúdo proteico e propriedades reológicas da massa no processamento dos grãos e da farinha de trigo em uma indústria alimentícia, as predizendo por meio de um robusto modelo de regressão através de técnicas quimiométricas, obtendo capacidades preditivas para entre 80 e 100% das amostras.

Outra aplicação quanto ao desenvolvimento de sensores para controle de processo na indústria química foi desenvolvida por Rady et al. (2019), para identificação de alergênicos em alimentos em pó na indústria alimentícia. Sensores de baixo custo na região próxima ao infravermelho utilizados juntos a condições ótimas de altura do sensor, intensidade luminosa e pré-processamento do espectro atingiram até 100% de acuracidade na predição de presença de compostos alergênicos, a partir de diferentes técnicas de aprendizagem de máquina, sendo uma solução de baixo custo para uma das principais preocupações desta indústria.

Uma aplicação também para a indústria alimentícia foi desenvolvida por Simeone et al. (2020), no que tange a limpeza efetiva da superfície dos equipamentos após o término do

processamento. Sensores óticos e ultrassônicos (com o processamento dos dados por redes neurais) e processamento de imagem foram utilizados para monitorar a retirada de incrustações, predizendo a quantidade de incrustação remanescente na superfície e indicando o término da limpeza, com acuracidade de até 98%.

Outro desenvolvimento deu-se na tentativa de integração de sensores, na qual Wang e Chiang (2019) concentraram seus esforços na fusão de sensores online, de sensores de *software* e na análise de laboratório para, a partir da retirada de ruídos, aumentar a confiabilidade e precisão das variáveis monitoradas, usando a inferência Bayesiana para tal.

Aplicaram então o sistema desenvolvido num processo de duas colunas de destilação para monitoramento da impureza do produto, constatando uma maior confiabilidade do que os sensores individuais (WANG; CHIANG, 2019). Isto mostra que aplicações 4.0 não necessariamente fazem uso de metodologias 4.0, contudo se integram numa maior coleta e uso de dados do processo para otimização deste.

Já Rychener, Montet e Hennebert (2020) desenvolveram uma arquitetura para o uso de *Machine Learning* na detecção de anomalias durante o processamento químico, a partir de três camadas: a camada industrial, que conta com os sensores e armazenamento de dados, a camada de serviço ICT, para processamento dos dados a partir de algoritmos de ML, e a camada de usuário, sendo a interface.

Os autores desenvolveram um estudo de caso da arquitetura proposta para a detecção de anomalias num reator de nitrogênio, no qual uma análise multivariável é preferível. Mesmo operando de forma satisfatória, a instabilidade da pressão num processo pode gerar muitos falsos negativos para alarmes, sendo necessárias formas adaptativas para detectar padrões anormais, algo possibilitado pelo uso de *Machine Learning*, de modo que para os autores seu uso na indústria é inevitável (RYCHENER; MONTET; HENNEBERT, 2020).

Sanchez et al. (2018), por sua vez, testaram diferentes técnicas de *Deep Learning* para, a partir de padrões de sinais da voltagem do processo, prever mudanças de espessura de peças usinadas num processo de eletroerosão, predizendo em até 97,4% dos casos estudados, permitindo a ação antes que haja a degradação da peça.

Susto et al. (2020) desenvolveram um algoritmo para, a partir de uma abordagem dirigida por dados, prever com maior precisão os pontos de amostragem no processo de deposição de vapor químico em um processo de fabricação de semicondutores, conseguindo resultados favoráveis em comparação com outros algoritmos e resultando em diminuição dos gastos com amostragem.

Outro desenvolvimento de algoritmo foi feito por Fu et al. (2019), que propuseram um algoritmo de otimização de reação química baseado em moléculas artificiais (do inglês *Artificial-Molecule-Based Chemical Reaction Optimization Algorithm*), que procurou otimizar o escalonamento de máquinas, no contexto de auto-otimização e auto-treinamento e de degradação de componentes que possam diminuir sua eficiência, atingindo melhores resultados que os algoritmos existentes.

Desse modo, percebe-se que muitos avanços na área de controle e gestão de processos se dão no desenvolvimento de sensores para um controle das variáveis de processo em tempo real e de algoritmos que possam realizar otimização deste, com uso principal de tecnologias disruptivas atuais que conduziram à Revolução 4.0.

5.2.2. Dados

A Revolução 4.0 perpassa por uma revolução no uso de dados, de modo que a exploração de como os dados podem ser usados pela indústria de processos tem conduzido a muitos estudos. Chiang, Lu e Castillo (2017) apontam para um amplo uso do *Big Data* na indústria química, destacando que esta foi uma das primeiras a adotar controle baseado em

computador, já que questões de segurança e de eficiência exigem um monitoramento contínuo das variáveis de processo.

Contudo, segundo eles, avanços na ciência de dados podem contribuir para a construção de modelos multivariáveis que detectem falhas de processo e condições de subutilização mais precisamente, utilizando ferramentas estatísticas e de *machine learning* que sobreponham as não-linearidades e a degradação do modelo. Permitem também sensores inferenciais que levam a uma resposta mais rápida da planta.

Uma outra área de aplicação citada por Chiang, Lu e Castillo (2017) é a da integração de toda a cadeia de negócio da planta química, o que diminui os tempos de espera entre as operações de ordem, venda, processamento e manufatura.

De acordo com Fisher et al. (2020), o aumento crescente de dados a partir da internet das coisas, o poder computacional possibilitado pela computação em nuvem e técnicas de aprendizagem de máquina para processamento de dados são os principais motores da modelagem matemática dos processos químicos dirigida a dados.

Segundo seu estudo de caso, numa empresa de gestão de resíduos e numa cervejaria, são muitos os desafios a serem enfrentados pelas indústrias (principalmente pequenas e médias empresas) para gerar modelos confiáveis e representativos dos processos, mas também são muitas as vantagens a serem obtidas, como aprimoramento da resiliência do processo e um entendimento mais profundo deste.

Qin e Chiang (2019) propõem o uso de *Machine Learning* e Inteligência Artificial como uma alternativa para a indústria lidar com a incerteza do processamento químico. O uso dos princípios físico-químicos tem que permanecer intacto, mas o alto volume de dados gerados permite que a sua análise preveja fenômenos de difícil modelagem, como a

desativação de um catalisador e a composição da matéria-prima, de modo que essas novas tecnologias devem trabalhar de acordo com estes princípios.

Já Piccione (2019) vê essa junção de conhecimentos da perspectiva da necessidade que engenheiros químicos têm de uma formação também voltada aos dados. Para ele, há a limitação tanto de uma visão puramente voltada aos dados, sem conhecimento das ciências naturais, como de uma insuficiente abordagem da ciência dos dados para os engenheiros, sendo barreiras a serem superadas para assistir e empoderar os engenheiros químicos na indústria.

A geração de um grande volume de dados (também conhecido como *Big Data*), contudo, também requer metodologias que os analisem e avaliem a sua qualidade e valor, de acordo com Reis e Kennet (2018). Para eles, a Revolução 4.0 perpassa principalmente por uma revolução dos dados, na qual os processos são centralizados nestes, contribuindo no monitoramento do processo, na manutenção preditiva e até mesmo no desenvolvimento de novos produtos.

Assim, para o acesso do seu valor, os autores propõem uma estrutura denominada InfoQ, cujo cálculo de nível baseia-se no objetivo da análise (em termos estatísticos ou analíticos), no conjunto de dados utilizados, no método empírico de análise e na utilidade (nível no qual o objetivo é alcançado). É possível observar que a velocidade de desenvolvimento de tecnologias 4.0 requer também *frameworks* referenciais que as avaliem e possibilitem o seu melhor proveito possível, por ser tudo muito novo e incerto.

5.2.3. Segurança do processo

Lithoxidou et al. (2020) propuseram uma metodologia dirigida a dados para identificação de três estados durante a operação de um reator químico, a saber: normal, de aviso e alerta, a partir de técnicas de *Machine Learning*. Identificaram dados pré-incidentes,

que resultaram em incidentes de 10 a 15 minutos depois, permitindo a elaboração de um sistema de monitoramento contínuo, com acuracidade de até 88,94%, de modo que a identificação do estado dos equipamentos pode evitar acidentes e perdas de tempo e dinheiro.

Kong et al. (2019), por sua vez, destacam que, apesar de haver um alto nível de automação e digitalização no processo produtivo da indústria 4.0, o homem não vai ser totalmente substituído por máquinas e robôs, visto que a experiência humana é insubstituível. Para uma simbiose homem-sistema ciberfísico, os autores propõem o uso de *Industrial Wearable Devices*, ou Dispositivos Industriais Vestíveis, isto é, dispositivos de internet das coisas usados no corpo que acrescentam ao homem conectividade e interatividade com o sistema, como luvas, óculos, relógios e sapatos inteligentes.

Com relação especificamente ao seu uso na indústria química, os autores os ressaltam na inspeção de equipamentos durante a operação, no sentido de segurança do processo, e o requisito de design que possuem de proteção a condições extremas de temperatura, umidade e choques, tanto em ambientes externos quanto internos, sendo sua principal finalidade a interação do homem com o dispositivo ou a captura de dados (KONG et al., 2019).

5.2.4. Desenvolvimento de produto

Uhlemann, Costa e Charpentier (2019) destacam o impacto de tecnologias 4.0 no design e engenharia do produto voltado à indústria química, que trata da elaboração ou melhoramento de produtos baseado nos requisitos dos consumidores e/ou novas tecnologias. Segundo eles, os desafios atuais são de transferir estudos subatômicos e moleculares para uma escala de produção e comercial, podendo ser impulsionado pelo *Big Data*, junto à inteligência artificial. Além disso, a manufatura aditiva auxilia no desenvolvimento de micro-equipamentos e micro-reatores ou no melhoramento de processos químicos tradicionais,

trazendo novos conhecimentos impulsionados pela Revolução 4.0 no campo de design de produto, abrindo novas possibilidades.

5.2.5. Simulação

Eibeck, Lim e Kraft (2019) enfatizam o fator de interoperabilidade como uma das chaves da Indústria 4.0, sendo esta a capacidade de um sistema de entender aos outros sistemas, bem como as suas funcionalidades. Nesse contexto, simuladores industriais desempenham um importante papel, de modo que os autores simularam um processo complexo de poluição industrial do ponto de vista semântico e ontológico, procurando ver as entidades envolvidas no processo e promovendo conexões entre elas através do simulador J-Park, desenvolvido pela Universidade de Cambridge.

5.2.6. Materiais

Quanto ao uso de tecnologias 4.0 para elaboração de novos materiais, Dobrzanski e Dobrzanska-Danikiewicz (2019) destacam que muita atenção tem sido dada à integração do sistema físico com o sistema computacional, visando o monitoramento, a coordenação, o controle e a integração do processo, e pouca tem sido oferecida ao progresso real nas máquinas e tecnologias de produção, bem como aos materiais utilizados nesta, apesar do avanço constante nestes campos de pesquisa.

Assim, os autores propõem a inclusão de tópicos como Materiais de engenharia, Manufatura e Máquina vivas e de bioengenharia como questões norteadoras da Indústria 4.0, para que se unam à internet das coisas, à computação em nuvem, entre outros avanços na área de tecnologia de informação. Citam, por exemplo, o destaque que baterias baseadas em vírus, filtros de água baseados em proteínas e compósitos de bioengenharia têm tido, tecnologias que não podem ser negligenciadas no âmbito de uma sociedade 4.0.

5.2.7. Gestão energética

Ao encararem o problema histórico do consumo de energia no processo de fundição de alumínio (responsável por entre 35% e 45% do custo de processamento), Gupta e Basu (2019) defendem que uma provável futura solução será obtida com a elaboração de um *Digital Twin* para a célula de fundição. Segundo eles, mesmo com intensa pesquisa da academia e da indústria, células de Hall-Héroult não foram substituídas comercialmente por inúmeras outras células em estado piloto, pelo alto custo operacional e por problemas para o *scale-up* encontrados. Assim, o *digital twin* levará a uma maior performance operacional, por permitir monitoramento contínuo das variáveis de processo.

5.2.8. Manutenção

A manutenção efetiva de uma planta química é fundamental para que não haja interrupções que levem a custos desnecessários, principalmente em processos contínuos. Neste sentido, Antomarioni et al. (2019) usaram regras de associação para definir conexão entre as quebras de componentes dos equipamentos e modelos matemáticos para otimização do plano de manutenção preditiva de uma refinaria e obtiveram bons resultados, destacando e mostrando que na era 4.0, de um alto volume de dados, técnicas podem auxiliar na extração de relações valiosas entre eles.

Assim pode-se observar que aplicações 4.0 para a indústria química podem estar relacionadas a estudos e análises já antes realizadas, contudo os avanços no campo da ciência de dados, internet das coisas e computação em nuvem permitem que uma análise mais aprofundada seja realizada, aprimorando técnicas e extraindo informações com mais precisão.

5.2.9. Implantação de tecnologias 4.0

Um outro campo de estudo não necessariamente ligado a aplicações se refere à implantação de tecnologias 4.0 na indústria química, para que esta possa ser considerada uma

fábrica inteligente, como já abordado. Diferentes realidades têm indicado diferentes iniciativas.

Shevtsova e Maslosh (2019) tratam do caso ucraniano. As crises político-econômicas na Ucrânia acabaram por dificultar o investimento na área de produção de químicos básicos, que acabou por perder força frente às pequenas e médias empresas e novos nichos de atuação. Assim, propõem um investimento rumo à Indústria 4.0 nestas empresas, como um guia para a implantação da quarta revolução em outros setores da economia. Por não serem de grande porte, contudo, os problemas estruturais devem ser superados por programas de financiamento e suporte ao seu crescimento. É fundamental assim o investimento em indústrias de crescimento nacional para promoção de tecnologias 4.0.

Já Gotz e Jankowska (2017) realizam um estudo de caso na implantação alemã, país que cunhou o termo “Indústria 4.0”. Segundo eles, neste país a indústria química tem projeção de crescimento de até 30% no período entre 2013 e 2025, contribuição principal de políticas ativas para a implantação de tecnologias 4.0, tanto do governo local quanto de organizações industriais.

Eles citam ainda a formação de *clusters* e o incentivo para excelência entre estes como um dos fatores que também impulsionam a adoção de tecnologias 4.0, com destaque para a indústria química no *cluster* denominado “Indústria Biotecnológica” de Dusseldorf, sendo um *cluster* de inovação aberta entre empresas grandes, universidades, médias e pequenas empresas e partes interessadas, que integra a cadeia de valor para a agroindústria, fornecedores, produtores biotecnológicos e indústrias consumidoras (GOTZ; JANKOWSKA, 2017).

No Brasil, Guarieiro et al. (2018) destacam a força do setor químico industrial, que é o oitavo do mundo, mas, em contraponto, apontam para o baixo nível tecnológico dos

produtos comercializados e para a baixa capacidade de inovação das empresas brasileiras (segundo pesquisa do Fórum Econômico Mundial em 2017, o Brasil ocupava a 85ª posição em inovação empresarial de 137 participantes).

Iniciativas como a meta de elevar a taxa de inovação de 36,4% para 45% da Confederação Nacional da Indústria, a aprovação do Marco Legal da Ciência Tecnologia e Inovação e a expansão das universidades e institutos de pesquisa no período aumentaram as expectativas de cooperação científica e tecnológica no que tange a Indústria 4.0, mas ainda de modo muito incipiente (GUARIEIRO et al., 2018).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de ter-se geralmente em mente a indústria manufatureira ao se tratar da Indústria 4.0, a indústria química também está a sofrer muitas transformações a partir de tecnologias disruptivas, como a internet das coisas, a computação em nuvem e sistemas ciberfísicos, que se unem aos avanços já desenvolvidos pela indústria, contribuindo para processos mais eficientes, mais seguros e que melhor atendam aos requisitos dos consumidores.

Muitas aplicações foram desenvolvidas para a indústria química, especialmente no que tange ao controle e à gestão de seus processos, principalmente a partir do desenvolvimento de sensores que controlam em tempo real as variáveis do processo e de algoritmos de *Machine Learning* que permitem que os sistemas funcionem de modo autônomo, buscando sempre a otimização.

É considerável também o número de aplicações voltadas à indústria química relacionadas ao melhor uso dos dados obtidos durante o processamento visando a sua conversão em informações precisas sobre o processo, levando ao desenvolvimento de metodologias de avaliação dos dados e de uma modelagem multivariável deste, o que antes, sem o desenvolvimento da ciência de dados, seria muito complexa.

Avanços também quanto à segurança do processo têm sido feitos, tanto no sentido da melhora da capacidade de diagnóstico de falhas no sistema, como no sentido da integração do homem com o sistema ciberfísico, proporcionando uma indústria mais segura.

Poucas aplicações foram vistas na literatura relacionadas ao desenvolvimento de produtos e de materiais. Verificou-se que isto se deve ao fato de muitas aplicações 4.0 serem relacionadas ao monitoramento do processo e não ao produto real. Contudo, avanços nessas

áreas podem contribuir grandemente para o desenvolvimento da indústria química no âmbito 4.0, principalmente quanto à bioengenharia e ao que são chamados “produtos vivos”.

Escassas aplicações também foram encontradas relacionadas à simulação do processo, à gestão energética e à manutenção. Um provável motivo venha a ser o fato da indústria 4.0 focalizar-se principalmente em sistemas autogerenciáveis, sendo os simuladores presentes mais na fase de planejamento do processo. Contudo, novos simuladores têm sido desenvolvidos, como o J-Park, no contexto da indústria 4.0, ligados também a causas ambientais, como o monitoramento da emissão de carbono.

Outro quesito avaliado é o relacionado à implantação de tecnologias 4.0 na indústria química em diferentes contextos nacionais, sendo essa não apenas uma questão de competitividade empresarial, mas também de estratégia nacional. Os países as têm adotado de forma diferente, de acordo com suas capacidades e interesse, políticas e cooperação para essa migração, de fundamental importância para o futuro de tais nações.

Políticas públicas e formação de *clusters* são um bom ponto de partida, mas no caso do Brasil torna-se preocupante a baixa taxa de inovação empresarial. Incentiva-se, portanto, novos estudos nesse quesito, para avaliação mais completa de como tem se dado a adoção de tecnologias 4.0 no mundo e vislumbres de como o Brasil pode encarar esse desafio, assim como médias e pequenas empresas podem ser inseridas neste contexto.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAZAM, M.; ZEADALLY, S.; HARRAS, K. A. Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 10, p. 4674-4682, 2018.

ANTOMARIONI, S.; PISACANE, O.; POTENA, D.; BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F. E.; DIAMANTINI, C. A Predictive Association Rule-Based Maintenance Policy to Minimize the Probability of Breakages: Application to an Oil Refinery. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 105, p. 3661-3675, 2019.

BABU, S. S.; GOODRIDGE, R. Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*, v. 31, n. 8, p. 881-883, 2015.

BOWLER, A. L.; BAKALIS, S.; WATSON, N. J. A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 153, p. 463-495, 2020.

BOWLER, A. L.; BAKALIS, S.; WATSON, N. J. Monitoring Mixing Processes Using Ultrasonic Sensors and Machine Learning. *Sensors*, v. 20, n. 1813, p.1-24, 2020.

BRITANNICA, Inc Encyclopaedia. *Encyclopædia britannica*. Encyclopaedia Britannica, Incorporated, 2020.

CHIANG, L.; LU, B.; CASTILLO, I. Big data analytics in chemical engineering. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, v. 8, p. 63-85, 2017.

CONTRERAS, J. D.; GARCIA, J. I.; PASTRANA, J. D. D. Developing of Industry 4.0 Applications. *International Journal of Online Engineering*, v.13, n. 10, p.30-47, 2017.

DA XU, L.; DUAN, L. Big Data for Cyber Physical Systems in Industry 4.0: A Survey. *Enterprise Information Systems*, v. 13, n. 2, p. 148-169, 2019.

DELOITTE. Industry 4.0 and the chemicals industry. Catalyzing transformation through operations improvement and business growth. Westlake – EUA, 2016, 24 p.

DOBRZÁNSKI, L. A.; DOBRZÁNSKA-DANIKIEWICZ, A. D. Why Are Carbon-Based Materials Important in Civilization Progress and Especially in the Industry 4.0 Stage of the Industrial Revolution. *Materials Performance and Characterization*, v. 8, n. 3, p. 337-370, 2019.

EIBECK, A.; LIM, M. Q.; KRAFT, M. An Ontology-Based Platform for Cross-Domain Scenarios in Process Industry. *Computers and Chemical Engineering*, v. 131, n. 106586, p. 1-9, 2019.

EIFERT, T.; EISEN, K.; MAIWALD, M; HERWIG, C. Current and future requirements to industrial analytical infrastructure – part 2: smart sensors. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 412, p. 2037-2045, 2020.

EISEN, K.; EIFERT, T.; HERWIG, C.; MAIWALD, M. Current and future requirements to industrial analytical infrastructure – part 1: process analytical laboratories. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 412, p. 2027-2035, 2020.

FABRIS, M.; ABBRIANO, R. M.; PERNICE, M.; SUTHERLAND, D. L.; COMMAULT, A. S.; HALL, C. C.; LABEEUW, L.; MCCAULEY, J. I.; KUZHIUPARAMBIL, U.; RAY, P.; KAHLKE, T.; RALPH, P. J. Emerging Technologies in Algal Biotechnology: Toward the Establishment of a Sustainable, Algae-Based Bioeconomy. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, n.279, p. 1-22, 2020.

FISHER, O. J.; WATSON, N. J.; ESCRIG, J. E.; WITT, R.; PORCU, L.; BACON, D.; RIGLEY, M.; GOMES, R. L. Considerations, challenges and opportunities when developing data-driven models for process manufacturing systems. *Computers and Chemical Engineering*, v. 140, p. 1-14, 2020.

FRAGA-LAMAS, P.; NOCEDA-DAVILA, D.; FERNÁNDEZ-CARÁMES, T. M.; DIÁZ-BOUZA, M. A.; VILAR-MONTESINOS, M. Smart Pipe System for a Shipyard 4.0. *Sensors*, v. 16, n. 2186, p. 1-43, 2016.

FU, Y.; ZHOU, M.; GUO, X.; QI, L. Artificial-Molecule-Based Chemical Reaction Optimization for Flow Shop Scheduling Problem with Deteriorating and Learning Effects. *IEEE Access*, v. 7, p. 53429-53440, 2019.

GAROFALO, M.; PELLEGRINO, M. A.; ALTABBA, A.; COCHEZ, M. Leveraging Knowledge Graph Embedding Techniques for Industry 4.0 Use Cases. *CoRR* abs/1808.00434, 2018.

GOTZ, M.; JANKOWSA, B. Clusters and Industry 4.0 – do they fit together?. *European Planning Studies*, v. 25, n. 9, p. 1633-1653, 2017.

GRASSI, S.; MARTI, A.; CASCELLA, D.; CASALINO, S.; CASCELLA, G. L. Electric drive supervisor for milling process 4.0: a process analytical approach with IIoT NIR Devices for common wheat. *Sensors*, v. 20, n. 1147, p.1-14, 2020.

GUARIEIRO, L. L. N.; PEREIRA, P. A. P.; VIEIRA, P. C.; LOPES, N. P.; ANDRADE, J. B. Eixos Mobilizadores em Química: Um Breve Olhar Quinze Anos Depois. *Química Nova*, v. 41, n. 10, p. 1226-1236, 2018.

GUPTA, A.; BASU, B. Sustainable Primary Aluminium Production: Technology Status and Future Opportunities. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 72, n.8, p. 2135-2150, 2019.

HOFMANN, E; RUSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, v. 89, p. 23-34, 2017.

KONG, X. T. R.; LUO, H.; HUANG, G. Q.; YANG, X. Industrial Wearable System: the Human-Centric Empowering Technology in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 30, p. 2853-2869, 2019.

LASI, H.; FETTKE, P.; FELD, T.; HOFFMAN, M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, v. 4, p. 239-242, 2014.

LEE, J.; KAO, H.; YANG, S. Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, v. 16, p. 3-8, 2014.

LEITNER, P.; WITTERN, J.; SPILLNER, J.; HUMMER, W. A Mixed-Method Empirical Study of Function-as-a-Service Software Development in Industrial Practice. *Journal of Systems and Software*, v. 149, p. 340-359, 2019.

LI, D. Perspective for smart factory in petrochemical industry. *Computers and Chemical Engineering*, v. 91, p. 136-148, 2016.

LITHOXOIDOU, E.; ZIOGOU, C.; VAFEIADIS, T.; KRINIDIS, S.; IOANNIDIS, D.; VOUTETAKIS, S.; TZOVARAS, D. Towards the Behavior Analysis of Chemical Reactors Utilizing Data-Driven Trend Analysis and Machine Learning Techniques. *Applied Soft Computing Journal*, v. 94, n. 106464, p. 1-16, 2020.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature Review of Industry 4.0 and Related Technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 31, p. 127-182, 2020.

PICCIONE, P. M. Realistic interplays between data science and chemical engineering in the first quarter of the 21st century: Facts and a vision. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 147, p. 668-675, 2019.

QI, Q.; TAO, F.; ZUO, Y.; ZHAO, D. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 72, p. 237-242, 2018.

QIN, S. J.; CHIANG, L. H. Advances and Opportunities in Machine Learning for Process Data Analytics. *Computers and Chemical Engineering*, v. 126, p. 465-473, 2019.

RADY, A.; FISCHER, J.; REEVES, S.; LOGAN, B.; WATSON, N. J. The Effect of Light Intensity, Sensor Height, and Spectral Pre-Processing Methods When Using NIR Spectroscopy to Identify Different Allergen-Containing Powdered Foods. *Sensors*, v. 20, n. 230, p.1-24, 2019.

RAJARAMAN, V. Cloud Computing. *Resonance*, v. 19, n. 3, p. 242-258, 2014.

REIS, M. S.; KENETT, R. Assessing the value of information of data-centric activities in the chemical processing industry 4.0. *Process Systems Engineering*, v. 64, n. 11, p. 3868-3881, 2018.

RIETZE, A.; JURGENSMEYER, N.; LIER, S.; KOHNKE, M; RIESE, J.; GRUNEWALD, M. Roadmap for a smart factory: a modular, intelligent concept for the production of specialty chemicals. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 57, p. 4242-4247, 2018.

ROJAS, R. A.; RAUCH, E. From a Literature Review to a Conceptual Framework of Enablers for Smart Manufacturing Control. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 104, p. 517-533, 2019.

RYCHENER, L.; MONTET, F.; HENNEBERT, J. Architecture Proposal for Machine Learning Based Industrial Process Monitoring. *Procedia Computer Science*, v. 170, p. 648-655, 2020.

SACOMANO, J. B.; GONÇALVES, R. F.; SILVA, M. T.; BONILLA, S. H.; SÁTYRO, W. C. *Indústria 4.0: conceitos e fundamentos*. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2018.

SANCHEZ, J. A.; CONDE, A.; ARRIANDIAGA, A.; WANG, J.; PLAZA, S. Unexpected Event Prediction in Wire Electrical Discharge Machining Using Deep Learning Techniques. *Materials*, v. 11, n. 1100, p. 1-12, 2018.

SANTOS, M. Y.; SÁ, J. O.; ANDRADE, C.; LIMA, F. V.; COSTA, E.; COSTA, C.; MARTINHO, B.; GALVÃO, J. A Big Data System Supporting Bosch Braga Industry 4.0 Strategy. *International Journal of Information Management*, v. 37, p. 750-760, 2017.

SCHLOGL, R. Catalysis 4.0. *ChemCatChem*, v. 9, p. 533-541, 2017.

SHEVTSOVA, H.; MASLOSH, O. Chemical production modernization in the formative phase of Industry 4.0: study of trends and problems of investment support. *Economics of enterprises: Economics and Management of Enterprises*, v. 45, p. 29-37, 2019.

SIMEONE, A.; WOOLLEY, E.; ESCRIG, J.; WATSON, N. J. Intelligent Industrial Cleaning: A Multi-Sensor Approach Utilising Machine Learning-Based Regression. *Sensors*, v. 20, n. 3642, p.1-20, 2020.

SLUSARCZYK, B. Industry 4.0 – Are We Ready?. *Polish Journal of Management Studies*, v. 17, n. 1, p. 232-248, 2018.

SUNG, T. K. Industry 4.0: A Korea Perspective. *Technological Forecasting & Social Change*, v. 132, p. 40-45, 2018.

SUSTO, G. A.; MAGGIPINTO, M.; ZOCCO, F.; MCLOONE, S. Induced Start Dynamic Sampling for Wafer Metrology Optimization. *Ieee Transactions on Automation Science and Engineering*, v. 17, n. 1, p. 418-432, 2020.

TECUCI, G. Artificial Intelligence. *WIREs Computational Statistics*, v. 4, p. 168-180, 2012.

UHLEMANN, J.; COSTA, R.; CHARPENTIER, J. Product Design and Engineering in Chemical Engineering: Past, Present State, and Future. *Chemical Engineering & Technology*, v. 42, n. 11, p. 2258-2274, 2019.

VELÁSQUEZ, N.; ESTEVEZ, E.; PESADO, P. Cloud Computing, Big Data and the Industry 4.0 Reference Architectures. *Journal of Computer Science and Technology*, v. 18, n. 3, p. 258-266, 2018.

WANG, Z.; CHIANG, L. Monitoring Chemical Processes Using Judicious Fusion of Multi-Rate Sensor Data. *Sensors*, v. 19, n. 2240, p. 1-117, 2019.

WORTMANN, F.; FLUTCHER, K. Internet of Things. *Business & Information Systems Engineering*, v. 57, n. 3, p. 221-224, 2015.

ZHENG, P.; WANG, H.; SANG, Z.; ZHONG, R. Y.; LIU, Y.; LIU, C.; MUBAROK, K.; YU, S.; XU, X. Smart Manufacturing Systems for Industry 4.0: a Conceptual Framework, Scenarios and Future Perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, v. 13, p. 137-150, 2018.

ZHONG, R. Y.; XU, X.; KLOTZ, E.; NEWMAN, S. T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, v. 3, p. 616-630, 2017.