

Indústria 4.0 e as inovações para a Engenharia Mecânica

Industry 4.0 and innovations for Mechanical Engineering

Industria 4.0 e innovaciones para la Ingeniería Mecánica

Recebido: 21/09/2023 | Revisado: 30/09/2023 | Aceitado: 02/10/2023 | Publicado: 05/10/2023

Lucas Fernando da Silva Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6849-8998>

Instituto Educacional de Minas Gerais, Brasil

E-mail: lucasfernando.tec@gmail.com

Eric Valero Carvalho da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0385-7619>

Instituto Educacional de Minas Gerais, Brasil

E-mail: evcdasilva@gmail.com

Resumo

Ao discutir inovação, a Indústria 4.0 emerge como um estágio avançado na Revolução Industrial, com potencial para estimular o crescimento econômico e o progresso. Devido a essa de produção em larga escala, houve um aumento na demanda por engenheiros mecânicos, isso ocorreu devido à crescente complexidade dos processos de produção, manutenção de máquinas e outros fatores. Assim o objetivo deste estudo foi investigar as inovações trazidas pela indústria 4.0 no ramo da engenharia mecânica, dentre essas inovações foi abordado também o impacto, desafios e benefícios da indústria 4.0 nessa área em questão; a manufatura no contexto dos princípios da indústria 4.0 e as ferramentas e tecnologias na aplicabilidade da manutenção. Na seção de resultados, foram abordados os tópicos delineados no objetivo, juntamente com a exploração mais detalhada de outras esferas relacionadas. Para elaboração desta pesquisa foi feito um estudo de revisão integrativa da literatura. A competência contínua na adaptação do sistema produtivo é essencial para o sucesso na fabricação. Profissionais preparados para a Era 4.0 vislumbram um futuro promissor. Há demanda por indivíduos inovadores e habilidosos, com conhecimento técnico, enquanto as inovações da Revolução 4.0 desafiam diversas áreas, especialmente a engenharia. A engenharia mecânica mantém um papel crucial na indústria, enquanto a inteligência artificial otimiza processos. A relevância do fator humano persiste quando a IA não é suficiente. A mecânica continuará vital na Era 4.0, automatizando tarefas e permitindo abordagem em outras áreas.

Palavras-chave: Engenharia mecânica; Mercado de trabalho; Evolução; Era 4.0; Atualidade.

Abstract

When discussing innovation, Industry 4.0 emerges as an advanced stage in the Industrial Revolution, with the potential to stimulate economic growth and progress. Due to this large-scale production, there was an increase in demand for mechanical engineers, this was due to the increasing complexity of production processes, machine maintenance and other factors. Therefore, the objective of this study was to investigate the innovations brought by industry 4.0 in the field. mechanical engineering, among these innovations the impact, challenges and benefits of industry 4.0 in this area in question were also addressed; manufacturing in the context of industry 4.0 principles and tools and technologies in the applicability of maintenance. In the results section, the topics outlined in the objective were addressed, along with more detailed exploration of other related spheres. To prepare this research, an integrative literature review study was carried out. Continuous competence in adapting the production system is essential for manufacturing success. Professionals prepared for Era 4.0 see a promising future. There is a demand for innovative and skilled individuals with technical knowledge, while the innovations of Revolution 4.0 challenge several areas, especially engineering. Mechanical engineering maintains a crucial role in industry, while artificial intelligence optimizes processes. The relevance of the human factor persists when AI is not enough. Mechanics will continue to be vital in Era 4.0, automating tasks and allowing approaches in other areas.

Keywords: Mechanical engineering; Labor market; Evolution; It was 4.0; Timeliness.

Resumen

Cuando se habla de innovación, la Industria 4.0 surge como una etapa avanzada de la Revolución Industrial, con potencial para estimular el crecimiento económico y el progreso. Debido a esta producción a gran escala, hubo un aumento en la demanda de ingenieros mecánicos, esto se debió a la creciente complejidad de los procesos de producción, mantenimiento de las máquinas y otros factores, por lo que el objetivo de este estudio fue investigar las innovaciones que trajo la industria 4.0 en el campo de la ingeniería mecánica, entre estas innovaciones también se abordaron los impactos, desafíos y beneficios de la industria 4.0 en este ámbito en mención; Fabricación en el contexto de los principios y herramientas de la industria 4.0 y tecnologías en la aplicabilidad del mantenimiento. En el apartado de resultados se abordaron los temas

planteados en el objetivo, junto con una exploración más detallada de otros ámbitos relacionados. Para preparar esta investigación se realizó un estudio de revisión integradora de la literatura. La competencia continua en la adaptación del sistema de producción es esencial para el éxito de la fabricación. Los profesionales preparados para la Era 4.0 ven un futuro prometedor. Existe una demanda de personas innovadoras y capacitadas con conocimientos técnicos, mientras que las innovaciones de la Revolución 4.0 desafían varias áreas, especialmente la ingeniería. La ingeniería mecánica mantiene un papel crucial en la industria, mientras que la inteligencia artificial optimiza los procesos. La relevancia del factor humano persiste cuando la IA no es suficiente. La mecánica seguirá siendo vital en la Era 4.0, automatizando tareas y permitiendo planteamientos en otros ámbitos.

Palabras chave: Ingeniería mecánica; Mercado de trabajo; Evolución; Era 4,0; Oportunidad.

1. Introdução

Os progressos tecnológicos ao longo dos anos têm gerado transformações significativas na sociedade, especialmente no cenário comercial (Marum *et al.*, 2022). Tanto organizações quanto consumidores estão adotando as ferramentas oferecidas, resultando em relações extremamente dinâmicas. Os consumidores, empoderados pela ampliação do acesso à informação e, conseqüentemente, à escolha, estão desempenhando um papel central.

Isso pressiona as empresas a inovarem e a incorporarem as melhores soluções tecnológicas para otimizar seus processos internos e atingir de maneira mais eficaz esse público. Nesse contexto, Morais e Monteiro (2019) as empresas buscam uma variedade de estratégias para acompanhar as mudanças de um mercado em constante mutação por meio da inovação.

Ao discutir inovação, (Chaves, 2022) a Indústria 4.0 emerge como um estágio avançado na Revolução Industrial, com potencial para estimular o crescimento econômico e o progresso. Essa fase incorpora uma variedade de tecnologias que automatizam e digitalizam procedimentos, aprimorando os modelos produtivos. Apesar dos notáveis progressos, o papel humano também permanece crucial, exigindo adaptação contínua às transformações em curso.

De acordo com Sacomano *et al.*, (2018), no início da era da produção em larga escala, houve um aumento na demanda por engenheiros mecânicos, isso ocorreu devido à crescente complexidade dos processos de produção, manutenção de máquinas e outros fatores. Na atual revolução industrial, essa tendência continua. Diariamente, esses profissionais se dedicam a otimizar, instalar, manter e operar máquinas, sistemas eletromecânicos, termodinâmica, estruturas e elementos de máquinas.

A centralização na indústria se destaca como um dos traços essenciais da Indústria 4.0, devido a esta ter historicamente agregado a maioria dos setores que propagam inovação e avanço técnico. Grande parte das melhorias e progressos produtivos conquistados por diversos setores está incorporada em máquinas e equipamentos, os quais, combinados a insumos de qualidade distinta, fornecem as ferramentas para o desenvolvimento de inúmeras atividades.

Assim o objetivo deste estudo foi investigar as inovações trazidas pela indústria 4.0 no ramo da engenharia mecânica, dentre essas inovações foi abordado também o impacto, desafios e benefícios da indústria 4.0 nessa área em questão; a manufatura no contexto dos princípios da indústria 4.0 e as ferramentas e tecnologias na aplicabilidade da manutenção.

Diante desse contexto, o problema de pesquisa consiste em entender: "Quais são as inovações trazidas pela Indústria 4.0 no campo da engenharia mecânica, e qual é o impacto, os desafios e os benefícios dessas inovações nessa área em questão?"

O tema da Indústria 4.0 na engenharia mecânica é importante devido às transformações tecnológicas palpáveis na sociedade e nos negócios. Isso justifica a pesquisa, pois a Indústria 4.0 revoluciona operações empresariais com automação, digitalização e tecnologias avançadas. Essa transição afetou a economia, impulsionando o crescimento para melhorar a eficiência e a competitividade. A engenharia mecânica desempenha papel central, gerenciando sistemas industriais. No entanto, essa transição traz desafios, como a adaptação contínua e a garantia de sistemas seguros, justificando a necessidade de compreender tais desafios e benefícios para orientar decisões organizacionais e profissionais da área.

2. Metodologia

Para elaboração desta pesquisa foi feito um estudo de revisão integrativa da literatura. Uma revisão integrativa, condensa o histórico de estudos empíricos ou teóricos, com o propósito de promover uma visão mais ampla acerca de um específico. Botelho (2011) afirma que o propósito deste enfoque de pesquisa é delinear uma avaliação detalhada do corpo de conhecimento que já foi planejado por pesquisas previstas relacionadas a um tópico em particular. A revisão integrativa capacita a fusão de múltiplas investigações já divulgadas, permitindo a concepção de novas perspectivas, apoiadas nos avanços delineados pelos estudos antecedentes

A questão em foco consiste em discernir de que maneira o rolamento com chaveta para mancal pode conferir vantagens, solucionando um problema frequente relacionado ao desgaste convencional que ocorre entre o mancal e o rolamento. A identificação das informações foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica. Conforme enfatizado por Gil (2017), uma pesquisa de fontes bibliográficas desempenha um papel preliminar essencial em praticamente todas as investigações acadêmicas.

Para a coleta de informações, foram abrangidos os estudos publicados durante um intervalo de 07 anos (2017-2023). A avaliação dos artigos ocorreu utilizando as plataformas de base de dados Google Acadêmico e Scientific Electronic Library Online (SciELO), além de artigos, teses, dissertações e livros disponíveis na íntegra com, a fim de reunir dados referentes indústria 4.0 e as inovações para a engenharia mecânica.

As palavras-chave utilizadas foram: “engenharia mecânica”, “inovação”, “tecnologia”, “indústria 4.0”.

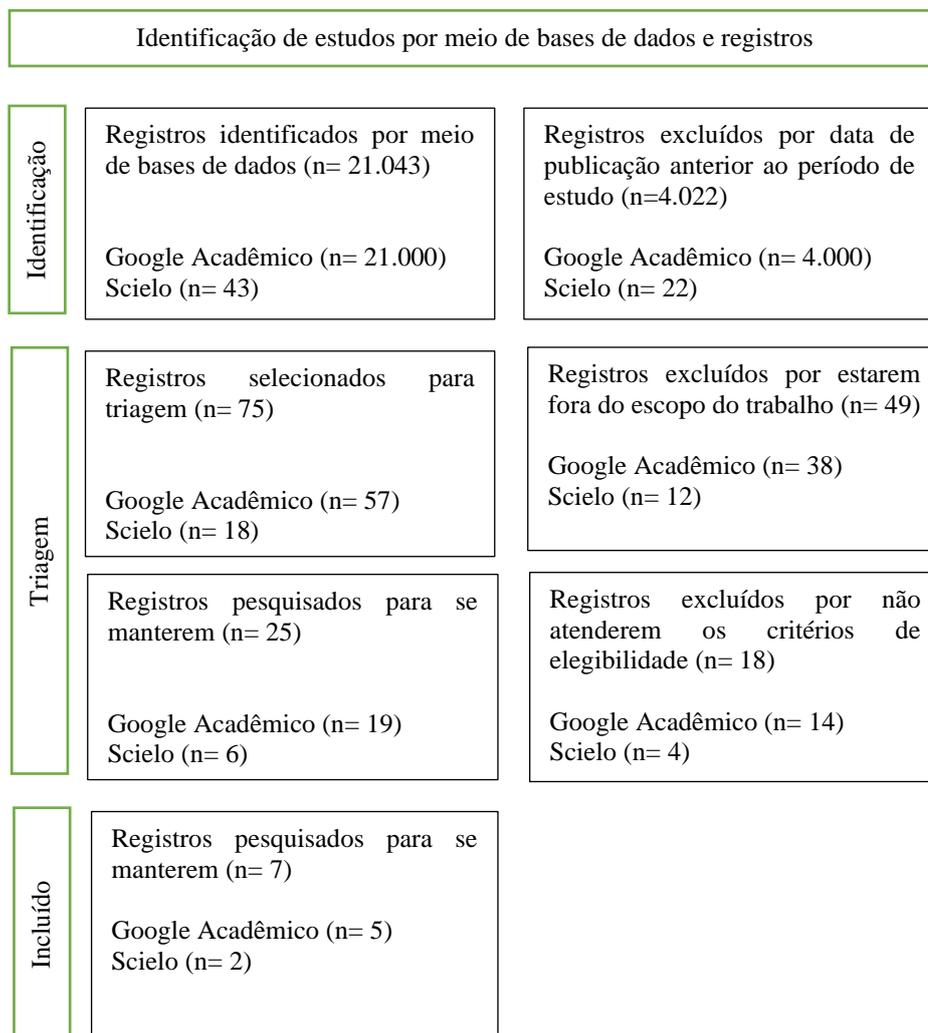
Para a seleção dos artigos, foram estabelecidos critérios de inclusão, os quais demandaram que os mesmos fossem sidos publicados em português, apresentassem conteúdo completo, estivessem disponibilizados gratuitamente, encontrados nas bases de dados estabelecidas e divulgados nos últimos dez anos.

Em contrapartida, foram estabelecidos critérios de exclusão para os artigos que fossem pagos, apresentassem informações incorretas ou incompletas, fossem em inglês e não possuíssem informações e fossem publicados há mais de dez anos.

Depois de uma seleção criteriosa dos textos, a teoria de cada um foi minuciosamente examinada. O processo de triagem dos documentos ocorreu em duas fases distintas. Inicialmente, foram considerados os títulos relacionados ao tema; os resumos das publicações definidas nessa etapa preliminar foram então detalhados, levando à exclusão dos que não se alinhavam com o tópico selecionado. Finalmente, na segunda fase, foi realizada uma avaliação completa do conteúdo dos artigos escolhidos nesta etapa anterior, resultando na eliminação dos que não atendiam aos critérios de inclusão (Souza et al., 2010). Os resultados surgiram após a etapa de leitura, análise e interpretação das informações extraídas.

Um total de 21.043 estudos foram descobertos e rastreados, com sua origem identificada nas bases de dados do Google Acadêmico (21.000 artigos) e SciELO (43 artigos). Destes artigos 4.022 foram descartados por terem sido publicados antes do período de estudo em questão. Posteriormente, 75 artigos passaram pelo crivo da avaliação, seguindo a verificação do escopo do trabalho. Destes 49 foram eliminados por não se relacionarem com a questão guia sobre " as inovações para a engenharia mecânica diante da indústria 4.0", restando, ao final, 25 artigos para análise. Mediante a aplicação de critérios de exclusão, 7 artigos foram retidos para a fase final de análise. Após uma fase inicial de leitura, os artigos passaram por uma nova análise com o intuito de serem examinados à luz da pergunta central, conforme indicado no diagrama apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de seleção de artigos.



Fonte: Autores.

3. Resultados e Discussão

Com base nos avanços da investigação, uma análise foi realizada sobre um conjunto de 07 estudos científicos, detalhados na Tabela 1. Os estudos escolhidos, primeiramente, foram revisados os objetivos e os resultados, sendo em seguida relacionados ao avanço da indústria 4.0 para e engenharia mecânica.

Tabela 1 – Artigos encontrados diante a revisão da literatura.

Autor, Ano	Título do trabalho	Objetivo/ Resultados
Carvalho et al., 2021	Indústria 4.0 e as inovações para a engenharia mecânica	<p>Enfatizar a implementação da Indústria 4.0 na esfera da gestão de manutenção e na disciplina da engenharia mecânica.</p> <p>Foi constatada a relevância da administração da Indústria 4.0 ao introduzir abordagens que aprimoram os sistemas de manutenção, incluindo a viabilização de métodos simplificados, como a execução de procedimentos remotamente e o acesso a dados relacionados à manutenção de equipamentos de qualquer lugar.</p>
Silva Júnior, 2023	O impacto tecnológico da indústria 4.0 no Brasil: alguns benefícios, consequências e desafios	<p>Potencialidades, desafios e dificuldades da Indústria 4.0, no Brasil</p> <p>Existem diversas vantagens em adotar a nova revolução industrial no Brasil, mas também se deparam com desafios significativos que precisam ser superados para sua ampla disseminação.</p>
Marum et al., 2022	Mudanças trazidas pela indústria 4.0 para a área da engenharia mecânica	<p>Explorar e situar a definição de inovação no âmbito da Indústria 4.0, estabelecendo vínculos com as transformações introduzidas no campo da engenharia mecânica.</p> <p>O profissional de engenharia mecânica permanecerá desempenhando um papel crucial e assumindo a responsabilidade por múltiplos processos e fases que somente sua expertise pode abordar. Contudo, ele contará com o auxílio de várias tecnologias provenientes da Indústria 4.0 para serem seus aliados.</p>
Amaral et al., 2022	Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento	<p>Detectar os obstáculos e direcionamentos emergentes da Indústria 4.0 em relação à Administração do Conhecimento.</p> <p>Três obstáculos e obstáculos se destacam no que diz respeito à Administração do Conhecimento na esfera da Indústria 4.0: a capacitação dos colaboradores, a partilha de conhecimentos e a adoção de tecnologias inovadoras.</p>
Perini et al., 2018	As ferramentas e tecnologias da indústria 4.0 e sua potencial Aplicabilidade na manutenção	<p>Mostrar a potencial aplicabilidade de ferramentas e recursos da Indústria 4.0 na manutenção.</p> <p>Dentre as inovações inseridas na Era da Manufatura Avançada, que têm o potencial de evoluir como substanciais aliadas para a preservação operacional, destacam as ferramentas tecnológicas usadas para a indústria 4.0</p>
Borlido, 2017	Indústria 4.0: aplicação a sistemas de manutenção	<p>Tomar conhecimento aprofundado dos novos conceitos explorados no setor e de saber como são aplicados.</p> <p>Em relação à implementação da Indústria 4.0 nos sistemas de manutenção, é relevante enfatizar que as melhorias abrangem o sistema em sua totalidade, tanto em termos de estrutura hierárquica quanto do desempenho social da empresa.</p>
Chaves et al., 2022	Propostas de utilização de uma impressora 3d no curso de engenharia mecânica	<p>Propor possibilidades de aplicação do recurso dentro das disciplinas ofertadas pelo curso</p> <p>Promover o estímulo ao emprego de uma impressora tridimensional no ambiente educacional é altamente significativo, visto que pode conferir maior dinamismo às atividades pedagógicas, influir positivamente na capacitação dos estudantes e também prestar assistência aos docentes em empreendimentos de pesquisa, instrução e alcance comunitário.</p>

Fonte: Dados coletados durante a pesquisa (2023).

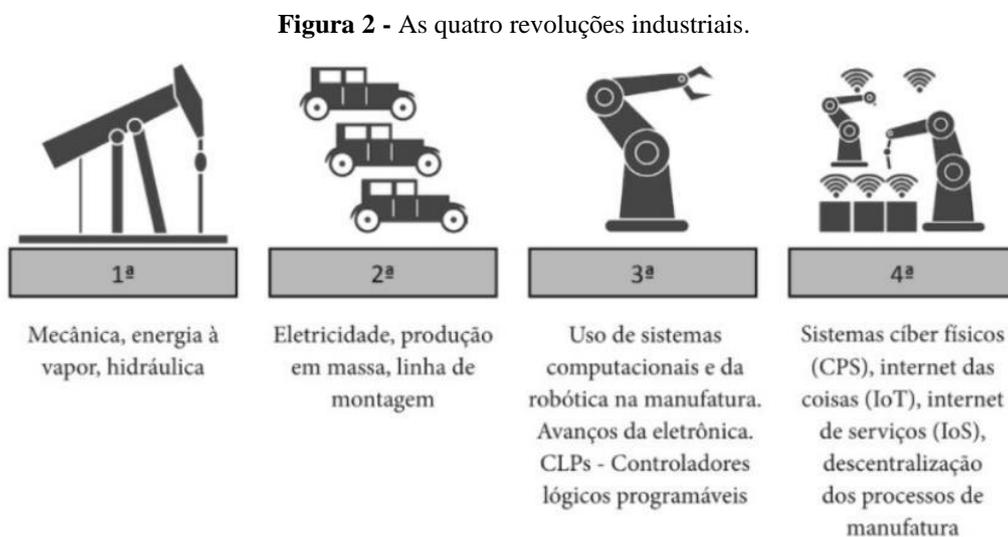
3.1 Indústria 4.0

A produção de mercadorias em larga escala teve início há um pouco mais de 2 séculos. Durante esse intervalo, o campo passou por diversas metamorfoses. Neste momento atual, a área está adentrando na época da Quarta Revolução Fabril, ou como é denominada, Manufatura 4.0. A denominação Manufatura 4.0 deriva dos estágios de desenvolvimento industrial ao longo do

curso do tempo, como é ilustrado na figura 1. No ano de 2011, por meio do esforço do governo germânico, o conceito "Manufatura 4.0" (M4.0) obteve ampla notoriedade. Seu propósito era aprimorar a competitividade da indústria da Alemanha (Silva Júnior, 2023).

Conforme indicado por Sacomano *et al.*, (2018), é de conhecimento que o início da transformação fabril teve lugar na transição entre os séculos XVIII e XIX e foi correlacionado à introdução de uma máquina a vapor em larga escala. Enquanto isso, a segunda mutação industrial, ocorrida no século XIX, está predominantemente ligada à implantação da produção em série e à eletrificação das máquinas e dos aparelhos. Sacomano *et al.*, (2018) enfatizam também que o uso de sistemas digitais programáveis em máquinas tecnologicamente avançado marcou o começo da terceira revolução fabril, ocorrida no século XX.

A figura 2 ilustra as quatro revoluções industriais. Cada uma delas marcou avanços tecnológicos significativos. A primeira trouxe a mecanização, a segunda a eletrificação. A terceira modificação é a automação, enquanto a quarta destaca a digitalização. Essas transformações moldaram profundamente o cenário industrial global:



Fonte: Marum *et al.*, (2022).

No presente momento, estamos claramente em direção à Era 4.0 da produção. Em outras expressões, devido à prevalência de aparelhos inteligentes, eles estão conduzindo a indústria à distribuição completa da governança do procedimento produtivo. Através das inovações na inteligência sintética, do processamento cognitivo e de outras criações tecnológicas, a automatização representa um passo orgânico para elevar a competitividade e a eficiência da indústria no século 21 (Sacomano *et al.*, 2018). De acordo com um estudo da perspectiva do BCG (2015), o conceito de Manufatura 4.0 incorpora novas tecnologias primordiais, as quais possuem um impacto crucial na produtividade e no desenvolvimento fabril. Essas tecnologias, de acordo com Marum *et al.*, (2022) compreendem:

Autômatos: ao longo de um extenso período, diversas indústrias têm empregado autômatos para desempenhar tarefas intrincadas, entretanto, esses autômatos estão buscando um caminho mais pragmático. Eles progredindo em termos de autonomia, flexibilidade e colaboração.

Fabricação Aditiva: já faz alguns anos que a área industrial começou a adotar a técnica de fabricação aditiva, mais conhecida como impressão 3D, principalmente para a criação de protótipos e produção de peças singulares. Com a chegada da Manufatura 4.0, esses processos aditivos ganham ampla utilização na fabricação de pequenos lotes de itens personalizados.

Modelagem Virtual: a modelagem tridimensional de produtos, materiais e procedimentos de produção já se encontra na prática. No futuro, a modelagem terá um papel ainda mais relevante nas atividades fabris, permitindo que os operadores testem

e otimizem virtualmente a configuração das máquinas antes da produção real. Isso resultará na diminuição do tempo de configuração das máquinas e na melhoria da qualidade do processo de produção.

Integração Sistêmica Horizontal e Vertical: trata-se da união de diversos segmentos industriais, assim como dos sistemas de tecnologia da informação, para conectar fornecedores, setores industriais e consumidores. Com a Manufatura 4.0 e a constante evolução das redes de integração de dados entre as indústrias, juntamente com a completa automação da cadeia de valor, empresas, departamentos, funções e recursos serão mais interligados.

Rede de Coisas Interconectadas (RCI): consiste em objetos ou elementos contendo processamento embutido, ligados a sistemas técnicos convencionais. Isso viabiliza a comunicação e interação entre os dispositivos em campo e com drivers centrais, quando necessário. Isso também distribui a análise e a tomada de decisões, e fornece respostas instantâneas.

Inteligência de Dados Amplos: dentro do âmbito da Manufatura 4.0, máquinas dependentes, sistemas produtivos, operações empresariais e sistemas de gestão de clientes também se tornarão normas que dão suporte a decisões em tempo real.

Computação em Nuvem: aplicativos entregues como serviços de armazenamento de informações através da internet. As empresas já empregam aplicações baseadas em nuvem em algumas áreas de negócios e análises, porém, com a Manufatura 4.0, mais organizações ligadas ao fluxo exigem maior compartilhamento de dados entre locais e empresas.

Salvaguarda de Rede: termo referente a uma série de abordagens e tecnologias desenvolvidas para proteger sistemas, computadores, redes e dados contra invasões e destruição ilegítima. Com a crescente conectividade habilitada pela Manufatura 4.0, a necessidade de garantir sistemas industriais cruciais e linhas de produção contra ameaças cibernéticas tem aumentado consideravelmente. Desta forma, a comunicação segura e o controle sofisticado de acesso aos dados, tanto de máquinas quanto de usuários, tornam-se indispensáveis.

Amplificação da Realidade: é uma técnica usada para integrar o mundo real com o virtual, inserindo objetos virtuais no contexto físico, apresentados ao usuário em tempo real por meio de dispositivos tangíveis. Adaptados para visualização e manipulação de objetos reais e virtuais. Sistemas baseados na amplificação da realidade viabilizam uma série de serviços, como seleção de peças em um estoque e envio de guias de reparo via dispositivos móveis. Esses sistemas possibilitarão às indústrias fornecer informações em tempo real aos seus trabalhadores, aprimorando a tomada de decisões e processos operacionais.

3.2 O Impacto da Indústria 4.0

Os efeitos gerados pela Indústria 4.0 não se limitam à simples digitalização; eles envolvem configurações mais intrincadas de inovação, oriundas da interseção de diversas tecnologias. Isso obrigará as empresas a revisitar seus métodos de gerenciamento de negócios e procedimentos. Uma constatação significativa é que entre 50% e 75% das dificuldades na implementação da tecnologia de fabricação avançada nos Estados Unidos derivam da agilidade, confiabilidade e adaptabilidade (Silva Júnior, 2023).

Um fator que muitas vezes é negligenciado reside na visão das vertentes humanas no emprego das tecnologias, tornando-se um elemento crítico para ocorrência de falhas, apontando a necessidade de uma nova abordagem tecnológica. Um dos obstáculos primordiais é a falta de análise das questões relacionadas aos fatores humanos (Silva Júnior, 2023).

A quarta revolução industrial, conforme Sacomano *et al.*, (2018), impulsiona avanços na ciência e tecnologia, com destaque para a Internet das Coisas (IoT) e suas tecnologias correlatas, que formam a base para os Sistemas Ciber-Físicos (CPS) e máquinas inteligentes. Esses elementos são usados para melhorar as cadeias produtivas. A principal vantagem da adoção da tecnologia digital inteligente é a maior eficiência e rapidez na fabricação.

O CPS é uma tecnologia primária nesse contexto, abarcando diversas tecnologias que possibilitam a criação de sistemas interconectados e inteligentes, promovendo a integração entre diferentes aspectos. O sistema segue três fases: coleta e aquisição

de dados, análise desses dados e suporte à tomada de decisão. Esse avanço transcende fronteiras organizacionais e geográficas, promovendo agilidade, inteligência e interconexão. No entanto, a velocidade e a complexidade dessa transição para uma nova era de digitalização, num ambiente globalizado, dificultam a compreensão coordenada dos impactos das ações entre países e regiões (Marum *et al.*, 2022).

A Internet das Coisas conecta o mundo de forma ampla, e a indústria também deve se alinhar a essa realidade. A Indústria 4.0 promove essa integração entre pessoas, máquinas e processos, buscando aprimorar a eficiência e inteligência da produção para atender às demandas do mercado (Sacomano *et al.*, 2018). Isso é um progresso conectando máquinas, sistemas e ativos, permitindo a criação de redes inteligentes que podem operar autonomamente ao longo da cadeia de valor. Em resumo, as fábricas inteligentes terão capacidade de programar a manutenção, prever falhas e se adaptar às mudanças na produção de forma autônoma.

Com a Indústria 4.0 e suas redes inteligentes, espera-se que desafios em saúde, transporte urbano e eficiência energética sejam enfrentados de forma mais eficaz (CNI, 2016). No entanto, a implantação dessa abordagem também deve considerar a necessidade de otimização do uso de recursos naturais escassos, soluções sustentáveis diante dos desafios ambientais (Silva Júnior, 2023).

A Indústria 4.0 trouxe mudanças nas habilidades possíveis para gerenciar a produção, exigindo profissionais com pensamento crítico, habilidades sociais, flexibilidade e capacidade de colaboração. A característica central é a integração digital, abrangendo a interconexão de engenharia e operações de produto para criar sinergias e melhorar a gestão de sistemas complexos (Silva Júnior, 2023). A concepção central da Indústria 4.0 é criar um ecossistema altamente econômico e cognitivo. O progresso tecnológico na aprendizagem de máquinas, computação em nuvem, robótica avançada e Internet das Coisas (IoT) é desenvolvido para ampliar a eficiência dos processos (Marum *et al.*, 2022).

Toda revolução traz tantas vantagens quanto a desafios, oportunidades e incertezas. Segundo Schwab (2016), estamos presenciando o início de uma transformação profunda que está impactando nossa maneira de viver, trabalhar e nos relacionar. As vantagens da quarta revolução industrial são evidentes: aumento da produtividade, eficiência e qualidade dos processos, aprimoramento da segurança dos trabalhadores por meio da redução de tarefas em ambientes perigosos e desenvolvimento de ferramentas que embasam decisões em dados, impulsionando a competitividade e atendendo às necessidades dos consumidores.

Na era da Indústria 4.0, a colaboração entre robôs e seres humanos ocorrerá com a utilização de sensores inteligentes e interfaces homem-máquina. Isso visa simplificar a vida humana e aumentar a eficiência na produção industrial, minimizando erros na fabricação. A base da Indústria 4.0 envolve tecnologias-chave, como a Internet das Coisas (IoT), sistemas ciber-físicos e análise de big data (Marum *et al.*, 2022).

De acordo com Domingues (2020), a Indústria 4.0 abrange avanços tecnológicos na automação da produção e tecnologia da informação, com o objetivo de criar processos mais ágeis, flexíveis e eficientes. A ideia central é integrar recursos físicos e digitais, conectando máquinas, sistemas e ativos para produzir produtos de alta qualidade a custos reduzidos. A realização desses objetivos requer uma forte interconexão entre as tecnologias principais (pilares) que compõem esse conceito. Marum *et al.*, (2022) afirma que essa integração possibilita uma resposta ágil às variações na demanda, oferta e falhas. Em termos verticais, essa integração capacita as fábricas a operar de maneira inteligente, atendendo de forma personalizada às necessidades específicas dos clientes em todas as etapas de produção.

Morais e Monteiro (2019) destacam a importância de as empresas se prepararem para os impactos futuros por meio de investimentos em tecnologias e capacitação de pessoal. Cavalcanti e Nogueira (2017) caracterizam a Indústria 4.0 pelo uso de processos com máquinas inteligentes, como a robótica colaborativa, e a comparam com revoluções industriais passadas como uma modernização digital. Esta etapa, que visa contribuir para o crescimento e o desenvolvimento econômico, incorpora várias

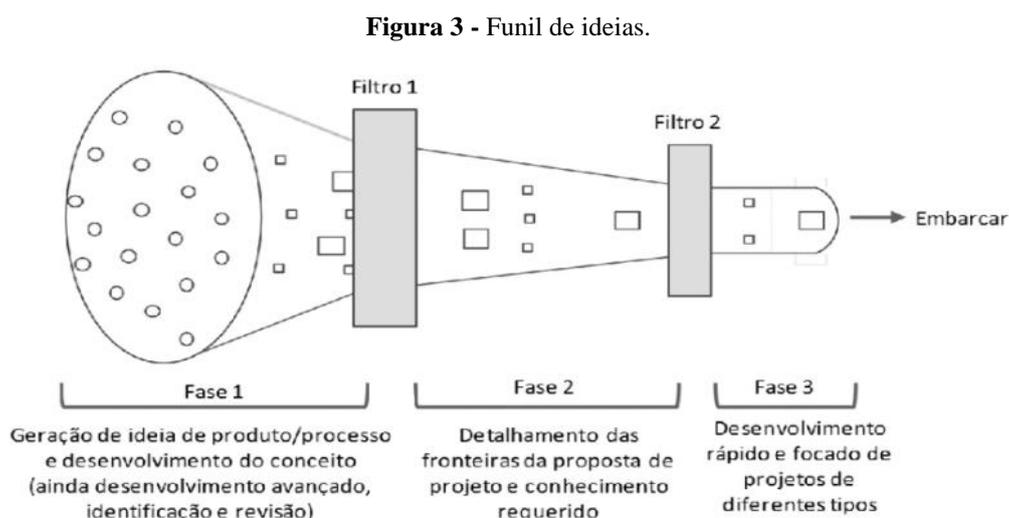
tecnologias que automatizam e digitalizam processos com maior controle. Em um mundo globalizado em constante avanço tecnológico, Soares (2018) destaca a mudança nos modos de pensar, agir e viver.

A tecnologia está alterando a dinâmica social e de mercado, permitindo que consumidores e empresas acessem e utilizem informações de forma mais eficaz. Gomes (2016) destaca que houve uma revolução no padrão tecnológico, afetando as relações entre produção e técnicas empregadas, o que impacta diretamente a produção de bens e serviços. Além disso, com o rápido desenvolvimento de tecnologias avançadas, é possível vislumbrar um mundo virtual emergente que direciona consumidores e empresas para uma próxima fase de desenvolvimento (Silva Júnior, 2023).

No contexto das mudanças atuais, a necessidade de inovação é uma constante devido aos avanços tecnológicos que aumentam a concorrência entre as organizações, proporcionando oportunidades para aprimorar processos. De acordo com Freitas Filho (2013), a inovação envolve a habilidade das organizações de aplicar criatividade e conhecimento para gerar mudanças que alterem o estado atual de um produto. Na Indústria 4.0, essa relação é fundamental, e a inovação é essencial para transformar os sistemas de produção por meio de tecnologias inteligentes, robótica, processamento confiável de dados, monitoramento e controle em tempo real (Silva Júnior, 2023).

Entretanto, é importante ressaltar que, embora a tecnologia seja um componente central desse processo, a presença do ser humano para tomar decisões continua sendo essencial. O sistema atua como um suporte significativo para as ações, mas a colaboração entre seres humanos e tecnologia é crucial para aprimorar as práticas de gestão, especialmente diante do foco crescente em inovação e para aumentar a eficiência do trabalho. Nesse contexto, destaca-se a relevância do uso de ferramentas como o “Funil de Inovação” (Barbalho *et al.*, 2015). Originalmente contratada por empresas de bens de consumo, essa ferramenta possui uma representação explicativa que auxilia na seleção de boas ideias (Clark e Wheelwright, 1993). Assim, esse processo facilita a tomada de decisões sobre as ideias inovadoras, promovendo a avaliação delas de maneira a resultar, ao final do processo, apenas nas ideias que demonstraram eficácia comprovada.

A Figura 3 demonstra um funil de ideias organizado para a seleção criteriosa de informações. As ideias passam por uma triagem inicial, seguida de análise de mercado e, finalmente, um segundo filtro técnico de aprovação.



Fonte: Marum *et al.*, (2022).

Essa ferramenta é organizada de forma para permitir a seleção de informações ou ideias. Desta forma, é observado que as ideias passam pelo primeiro de aprovação, sendo selecionadas, conceituadas e avaliadas somente aquelas com maior potencial

de sucesso. Após essa etapa, é conduzida uma análise de previsões e de mercado, seguida pelo segundo filtro técnico de aprovação. Por fim, as ideias avançaram para a fase de planejamento, execução e entrega, conforme descrito por Ganguly (1999).

Nesse contexto, torna-se claro que, em meio a um ambiente dinâmico com alta competitividade, é crucial tomar decisões baseadas em informações transmitidas. Essas informações são selecionadas por indivíduos e disponibilizadas pelas tecnologias disponíveis, que aprimoram e fornecem subsídios aos gestores das organizações. O Funil de Inovação surge como uma ferramenta essencial, permitindo a seleção e implementação das ideias mais promissoras (Silva Júnior, 2023). No entanto, uma das transformações mais significativas da Indústria 4.0 se manifestará no âmbito social, particularmente no cenário de trabalho, empregabilidade e na necessidade de as pessoas atualizarem suas competências para lidar com as novas tecnologias e garantir sua empregabilidade (Marum *et al.*, 2022).

3.3 A indústria 4.0 e a engenharia mecânica

De acordo com as conclusões de Sacomano *et al.*, (2018), o início da era da produção em larga escala trouxe consigo uma demanda crescente por engenharia especializada em diversos domínios, como mecânica, produção, eletricidade e química. Esse aumento na procura foi primordialmente impulsionado pela crescente complexidade dos processos fabris, assim como pela manutenção das máquinas e dos equipamentos, entre outras variáveis relevantes. Nesse cenário da revolução atual, a situação não é diferente. Engenheiros mecânicos têm uma atuação constante no desenvolvimento de planos para sistemas mecânicos e termodinâmicos.

Cotidianamente, os especialistas atuam em ações que têm como objetivo aprimorar, implantar, preservar e dirigir máquinas, com base em termos termodinâmicos, sistemas eletromecânicos, construções e componentes de aparelhagens, partindo desde sua idealização, avaliação e escolha de matéria-prima, até a etapa de fabricação, comando e conservação (CONFEA, 1973).

Dentro da perspectiva da Manufatura 4.0, a disciplina de engenharia mecânica preservará sua responsabilidade sobre os sistemas de movimento e configuração, hoje em dia, é imperativo buscar soluções que amalgamem materiais que sejam simultaneamente robustos e leves, compreender a composição dos polímeros e outros elementos e controlar os fluxos de dados. Além disso, é viável conceber métodos de manutenção que sejam mais práticos e ágeis, tendo em vista a redução dos desperdícios resultantes de falhas. De acordo com o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Espírito Santo (CREA ES, 2019), nesse contexto revolucionário, os engenheiros assumem um papel mais destacado não apenas como usuários de tecnologia, mas também como agentes centrais no processo de reformulação da indústria.

De acordo com as contribuições de Silva Júnior (2023), uma característica primordial do novo modelo da Manufatura 4.0 é a interligação de dispositivos, procedimentos, organizações de produção e destinatários finais, resultando em um sistema flexível, já que as demandas de produção podem ser ajustadas individualmente com base nas necessidades dos consumidores finais. Este cenário impõe exigências de manutenção, com o objetivo de garantir maior eficácia e confiabilidade na operação rotineira. Isto é, a manutenção é para garantir a disponibilidade e a integridade do processo.

As técnicas empregadas na Era 4.0 de fabricação se concentram na criação aprimorada por dados (Sacomano *et al.*, 2018), por isso, os campos da engenharia mecânica e da engenharia de produção industrial têm vantagens distintas. Um exemplo concreto se manifesta na melhoria do monitoramento global na fábrica, diminuindo variáveis como produtividade, desperdícios, tempos de fabricação, interrupções de maquinário, e outros. Além disso, é vital notar que esses dados físicos podem ser convertidos em formatos digitais, prontos para serem compartilhados e submetidos a análise. Dentro do panorama da Manufatura 4.0, a engenharia mecânica mantém a responsabilidade sobre todos os componentes e esquemas que guiam o processo, porém, é fundamental encontrar abordagens adequadas para se alinhar ao progresso tecnológico 4.0.

Nos casos em que a inteligência artificial e os processos avançados não superam a necessidade de eficiência, os especialistas em engenharia mecânica também desempenham um papel colaborativo. Isso engloba o planejamento de elementos

industriais, dispositivos e sistemas, bem como a supervisão das linhas de produção de processos fabris. Os engenheiros mecânicos também podem estar envolvidos na implementação e testes de produtos e sistemas, além de monitorar as atividades de manutenção de equipamentos (Silva Júnior, 2023).

Dentre os diversos setores de engenharia mecânica, podemos destacar algumas categorias e o impacto da Revolução Industrial 4.0 sobre cada uma delas. No campo da engenharia mecânica aplicada a automóveis, que envolve atividades como o planejamento, desenvolvimento e aprimoramento de veículos, as inovações advindas da Manufatura 4.0 têm o potencial de medir e melhorar o consumo de combustível, assim como reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2). Essa abordagem contribui igualmente para o avanço sustentável, um elemento inseparável das inovações, e para a criação de um ambiente inteligente e ambiental que atenda às demandas dos consumidores (Silva Júnior, 2023).

No âmbito da engenharia mecânica externa à biomedicina, cujo foco está em projetar dispositivos que possam suprir as necessidades de pessoas em situações específicas, como membros artificiais e cadeiras de rodas, a influência da Manufatura 4.0 se manifesta tanto na concepção e fabricação desses dispositivos quanto na avaliação de seu desempenho. Tecnologias como inteligência artificial, integração de sistemas e sistemas de simulação possibilitam uma análise de dados que capacita o engenheiro mecânico a prever potenciais falhas ou defeitos com base em variáveis, permitindo a antecipação e correção desses problemas. Isso resulta em uma redução substancial da margem de erro na fase de elaboração do produto final (Marum *et al.*, 2022).

Uma outra esfera que está em contínua expansão e absorvendo uma quantidade específica de engenharia mecânica é a indústria petroquímica. O engenheiro mecânico com especialização petroquímica pode atuar tanto na engenharia dos processos quanto na área de produção. Diante da consideração sobre o acesso limitado à água potável, um desafio que afeta uma parcela específica da população global, é necessário ter em mente que isso implica na necessidade de um extenso sistema de tubulações, como quais são os produtos derivados da petroquímica (Marum *et al.*, 2022).

Através da rede de objetos interconectados e da interligação de aparelhos, eles irão se vincular, compartilhar dados, processá-los e executar as operações determinadas. O engenheiro mecânico especializado em questões petroquímicas, diante desse cenário, terá a responsabilidade de analisar os registros adquiridos e converter essas informações em sabedoria para o aprimoramento contínuo dos processos (Rotta, 2017).

No território brasileiro, estima-se que a implementação da Revolução Industrial 4.0 traz vantagens como incremento de produtividade, redução de custos, monitoramento preciso do fluxo de produção e adaptação da produção às necessidades individuais. Um levantamento conduzido pela Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) projetou que, ao considerar a otimização da eficiência, a redução dos custos de manutenção das máquinas e a redução do consumo de energia, os gastos industriais do Brasil podem ser diminuídos em 73 bilhões de reais (Rotta, 2017).

Na atual paisagem industrial, um dos setores da Engenharia Mecânica que pode obter vantagens significativas da Revolução Industrial 4.0 é o campo de manutenção industrial, incumbido de manter toda a operação fabril em sua condição ótima e garantir o progresso contínuo dos procedimentos (Sacomano *et al.*, 2018). Com o aperfeiçoamento da automação fabril e o impacto gerado pela terceira revolução industrial, as indústrias passaram a necessitar cada vez mais de profissionais especializados para realizar a manutenção e conserto de maquinário, além desses especialistas serem responsáveis por uma ampla variedade de tarefas e por continuar expandindo suas competências. Isso resultou na emergência da demanda por uma otimização da indústria e um atendimento mais eficaz, transferindo uma administração mais eficaz das máquinas e sua manutenção.

A Confederação Nacional da Indústria contribuiu com um estudo abrangente que abarcou diversas esferas do domínio industrial. Dentro deste espectro, a esfera de manutenção como uma das menos aderentes à tecnologia digital em suas operações, a interseção entre diferentes setores industriais e o uso de tecnologias digitais. Isso ilustra como a digitalização está permeando diversos campos industriais, impulsionando a automação, a análise de dados e a eficiência operacional. Essa convergência é

fundamental para a modernização da indústria e a preparação para desafios futuros, como a Indústria 4.0, promovendo a inovação e a competitividade. (CNI, 2016).

Ao incorporar os princípios da Indústria 4.0 nessa esfera, é viável avançar na coleta e refinamento dos dados provenientes das máquinas, aproveitando sua tecnologia intrínseca, aumentando sua capacidade de processamento e monitoramento realizado em tempo real, encontrando soluções otimizadas para os desafios. Essa abordagem resulta em uma redução significativa do tempo de inatividade do equipamento (Marum *et al.*, 2022),

Em um relatório datado de 2016, a FIRJAN delineou a relação da Indústria 4.0 com o contexto brasileiro. O documento destaca que a maior parte da indústria nacional ainda oscila entre a segunda e terceira revoluções industriais, transitando entre linhas de produção e a introdução da automação. A área mais progressista nesse aspecto, segundo o mesmo relatório, é a indústria automotiva, cujos profissionais estão constantemente atualizando suas competências para atender às demandas emergentes. A indústria automotiva, repleta de profissionais, especialmente engenheiros mecânicos, pode desempenhar um papel crucial em outros setores também (Firjan, 2016). Aprimorar a competitividade da indústria brasileira em escala global pode ser estimulado através da adoção da digitalização, contribuindo para o fortalecimento da economia e diminuir um cenário favorável à incorporação das tecnologias da Indústria 4.0 no contexto nacional.

3.4 As ferramentas e tecnologias da indústria 4.0 e sua potencial aplicabilidade na manutenção

Conforme Carvalho *et al.*, (2021) a gestão da manutenção desempenha um papel fundamental na sociedade, envolvendo engenheiros que aprimoram continuamente suas habilidades para resolver desafios na cadeia de produção e no uso de produtos, além de analisar seu impacto na sociedade.

Essa área de conhecimento está constantemente evoluindo e aperfeiçoando tecnologias para melhor atender às necessidades das pessoas. Os engenheiros mecânicos estão envolvidos na produção e manutenção de produtos, aplicando seus estudos e trabalho em diversas esferas da comunidade, abrangendo desde dispositivos domésticos até projetos automotivos e espaciais (Carvalho *et al.*, 2021).

Ao examinar o contexto da manutenção, a operação contínua dos equipamentos, a empresa emprega abordagens qualitativas para garantir sua conformidade e preservar sua infraestrutura. Essas abordagens qualitativas têm sua fundamentação no histórico de manutenção dos equipamentos ou instalações, em projetos, desenhos técnicos e, sobretudo, na experiência e conhecimento da equipe responsável (Carvalho *et al.*, 2021).

Uma das abordagens é uma manutenção corretiva, acionada para reparar danos imediatos decorrentes de falhas, erros no equipamento ou até mesmo erros operacionais. Essas falhas podem indicar a presença de problemas no projeto ou na utilização do equipamento, ou que requerem uma avaliação cuidadosa para identificar a causa principal da falha e prevenir a necessidade de retrabalho (Perini, 2018).

Existem outras técnicas, como manutenção preventiva, que são realizadas em intervalos de tempo específicos de acordo com a vida útil do equipamento. Além disso, a manutenção preditiva é empregada por meio de uma vigilância sistemática e controle, minimiza ou evita falhas no funcionamento do equipamento, garantindo sua confiabilidade operacional em condições semelhantes às originais de fábrica (Perini, 2018).

De acordo com Kardec (2009), a manutenção desempenha um papel fundamental na logística interna das empresas, organizada como um suporte eficaz para a melhoria do desempenho geral. A gestão da manutenção contribui para processos criativos e flexíveis, aprimorando a eficiência e a rentabilidade das empresas. Essa abordagem também promove a ideia de que a mudança pode ser benéfica e destaca a importância do trabalho em equipe, enfatizando que a manutenção está interligada com todos os aspectos das organizações. Estudos indicam que muitas empresas regularam a rentabilidade da manutenção preventiva,

considerando-a um investimento que contribui para a longevidade da empresa ao reinvestir parte dos lucros em seu próprio patrimônio, garantindo sua sustentabilidade ao longo do tempo.

De acordo com Perini *et al.*, (2018), a questão do investimento em manutenção é abordada em relação à percepção da empresa, explorando uma perspectiva mais concisa. A compreensão de que os processos de fabricação, produção e manutenção estão intrinsecamente conectados traz benefícios abrangentes.

Kardec (2009), por sua vez, destaca que muitas empresas agendam os desafios associados à função de manutenção e adotam políticas ou estratégias para elevar seu status, equiparando-a a outras funções organizacionais. A manutenção é percebida como parte integrante das estratégias para a excelência organizacional. Encarar a manutenção apenas como uma função tática e operacional é adotar uma visão limitada.

Dentro do contexto da gestão da manutenção, encontramos um conjunto abrangente de ações que englobam diversas atividades. Nesse âmbito, o engenheiro mecânico desempenha um papel crucial ao definir as abordagens para a manutenção, incluindo o gerenciamento dos recursos necessários para essa função (Kardec, 2009).

A elaboração da manutenção não se limita apenas à identificação de falhas; também envolve a criação de programas que evitam essas falhas, melhorando o desempenho das tecnologias empregadas e monitorando a vida útil dos dispositivos correspondentes. No contexto da produção, a gestão da manutenção abrange várias etapas, sendo as mais notáveis a manutenção corretiva e a preventiva (Perini, 2018).

No contexto da gestão da manutenção, englobando um conjunto abrangente de ações, a manutenção corretiva desempenha um papel central. Como o próprio nome sugere, ela visa corrigir erros que ocorram durante a produção e utilização do produto. Essa abordagem pode ser subdividida em dois tipos: a corretiva inesperada, que lida com falhas não previstas, e a corretiva ocasional, que ocorre devido a fatores externos à empresa, como a escassez de matéria-prima (Borlido, 2017).

A manutenção preventiva, por sua vez, baseia-se num conjunto de ações que visam antecipar potenciais problemas, mantendo o equipamento em funcionamento adequado. Essa abordagem se apoia principalmente no conhecimento profundo do engenheiro sobre o produto em si: sua fabricação, aplicações, histórico de falhas e suas soluções. Essas informações são adquiridas por meio da análise de estudos realizados no campo do conhecimento e também por testes nos equipamentos para garantir o seu desempenho (Borlido, 2017).

A aplicação da gestão da manutenção na engenharia mecânica é considerada um dos níveis mais elevados de excelência. Isso porque ela representa a busca constante pela preservação e continuidade dos projetos desenvolvidos, mantendo o padrão de qualidade exigido nos produtos. Portanto, em sua essência, a gestão da manutenção assegura a continuidade do uso dos produtos, independentemente de sua natureza (Carvalho *et al.*, 2021).

Quanto à inovação de maneira eficaz, a gestão da manutenção traz consigo uma série de benefícios para a empresa, que vão desde a redução de gastos até melhorias na produção. Para alcançar tais resultados, é fundamental a utilização contínua e eficiente das ferramentas disponíveis, de modo a promover a melhoria contínua na companhia (Chiavenato, 2009).

A integração dos diversos tipos de manutenção no âmbito da gestão da manutenção traz maior eficácia e redução de custos na sua aplicação. Essa abordagem permite a utilização de abordagens mais econômicas para determinadas máquinas e equipamentos, bem como a aplicação de métodos mais modificados, como manutenção preventiva, em locais onde a necessidade é mais significativa (Carvalho *et al.*, 2021).

Uma das formas de integração mais reconhecidas é a combinação da manutenção corretiva com a manutenção preventiva. Nesse caso, a manutenção preventiva é aplicada em todas ou na maioria das máquinas e equipamentos. Quando ocorre uma parada ou quebra de alguns desses elementos, a manutenção corretiva é então empregada (Perini, 2018).

Uma abordagem mais eficaz dessa abordagem é a incorporação da manutenção preditiva, que permite que a maior parte das máquinas e equipamentos sejam submetidos principalmente à manutenção preditiva, resultando na redução dos custos

associados às paradas e manutenções preventivas. Através desta abordagem, torna-se viável reservar a manutenção preventiva apenas para máquinas e equipamentos específicos, nos quais a necessidade é mais urgente e a interrupção pode ser realizada com menor dificuldade. Adicionalmente, a manutenção corretiva é considerada como última alternativa para corrigir falhas nos equipamentos (Perini, 2018).

Por meio da aplicação adequada dos três principais tipos de manutenção em conjunto, por meio da implementação da gestão da manutenção, é possível identificar uma série de vantagens para a empresa, incluindo o aprimoramento de seus produtos, o aumento da eficácia do processo e o fortalecimento da confiabilidade organizacional, entre outros aspectos positivos (Amaral *et al.*, 2022).

Aumento da Lucratividade: O aperfeiçoamento na lucratividade dos produtos e dos próprios colaboradores emerge como um dos pontos de gestão da manutenção. Quando todos os funcionários se empenham na busca contínua pela melhoria da qualidade, tanto o trabalho por eles realizado quanto os produtos finais gerados pelo processo de produção são aprimorados. Isso resultou em um aumento significativo na lucratividade ao ser comparado com os números anteriores à implantação da gestão da manutenção (Amaral *et al.*, 2022).

Melhor Satisfação dos Clientes: Com a melhoria da rentabilidade dos funcionários e processos, a empresa consegue fabricar produtos de qualidade superior. Isso resulta diretamente na satisfação do cliente final, pois o produto adquirido atende às suas necessidades e, dependendo do alto nível de qualidade já realizado pela empresa, pode até mesmo superar as expectativas do cliente (Amaral *et al.*, 2022).

Aprimoramento da Competitividade: Ao possuir produtos de qualidade superior e processos eficientes, a empresa eleva sua capacidade competitiva em relação a outras organizações do mesmo setor. Quanto mais vantajosos forem os produtos em comparação com os concorrentes, maior será o número de clientes que optarão pela empresa (Amaral *et al.*, 2022).

Além dessas vantagens, segundo autora supracitada, a gestão da manutenção também proporciona uma adaptação mais eficaz à implementação de novas tecnologias na área. O planejamento pela gestão da manutenção possibilita a alocação adequada das novas tecnologias e a orientação conforme as necessidades de cada equipamento, um exemplo concreto disso é a integração da Indústria 4.0 e suas tecnologias.

Nesse contexto, é crucial ajustar os equipamentos para essa tecnologia emergente. Borlido (2017) afirma ser de suma importância identificar quais equipamentos devem passar por essa modernização (retrofit) e quais tecnologias são mais relevantes para as operações da empresa. Esse esforço visa colher de maneira mais eficiente os benefícios da aplicação da Indústria 4.0 na manutenção.

3.5 A manufatura no contexto dos princípios da indústria 4.0: barreiras e impactos

Diversos autores abordaram fragmentadamente as barreiras associadas à implementação da Indústria 4.0. Por exemplo, a falta de mão de obra comprometida, os conflitos entre os trabalhadores devido a mudanças nos ambientes de trabalho, a restrição de recursos financeiros, a segurança de dados, a falta de padronização, e a compreensão limitada da arquitetura de integração e sistemas são considerados obstáculos importantes para a adoção da Indústria 4.0 (Quarta Revolução Industrial) de acordo com Chaves (2023).

Até agora, essas barreiras foram abordadas individualmente e muitas vezes a partir de uma perspectiva tecnológica. A implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 é um processo intrincado, onde os fatores estão interligados, exigindo uma análise global de todos esses elementos (Horvath *et al.*, 2019). Muitas pesquisas têm se concentrado nas barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (Türkeş *et al.*, 2019). Esses estudos destacam os obstáculos que afetaram muitas empresas em nações direcionadas ao desenvolvimento, como Romênia, Dinamarca, Hungria e Suécia, impedindo a plena adoção da transformação digital.

As descobertas atuais indicam que a falta de conhecimento sobre a Indústria 4.0, a atenção intensa nos custos de desenvolvimento das empresas e a falta de compreensão da importância estratégica da Indústria 4.0 destacadas como principais barreiras enfrentadas por pequenas e médias empresas na Romênia ao adotar as tecnologias dessa revolução industrial (Türkeş *et al.*, 2019).

No geral, uma explicação possível para esses resultados surpreendentes pode ser o foco atual que as empresas atribuem à Indústria 4.0, especialmente em contextos socioeconômicos semelhantes ao do Brasil. Frank *et al.*, (2019) indicaram que a adoção e o entendimento das tecnologias associadas à Indústria 4.0 ainda estão em estágio inicial nas empresas brasileiras, já que a implementação de certas tecnologias, como o Big Data, é menos difundida em comparação com outras, como a IoT.

Além disso, devido ao investimento específico de capital necessário para adotar a Indústria 4.0, a maioria das empresas no Brasil pode encontrar dificuldades com esses custos. Portanto, a incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0 pode ser direcionada e limitada a processos críticos que envolvem níveis mais altos de organização, abrangendo diversos produtos, departamentos, locais, clientes ou fornecedores, como megaprocessos (Tortorella *et al.*, 2018).

Os impactos da Indústria 4.0 decorrem da inovação e do aprimoramento tecnológico, desempenhando um papel crucial em todas as organizações. No entanto, os avanços na transformação digital e a interconectividade crescente apresentam novos desafios para as empresas, uma vez que a Indústria 4.0 traz mudanças substanciais nos produtos e nos sistemas de produção em termos de design, processos, operações e serviços (Chaves, 2023).

A Indústria 4.0 tem impactos e influências que podem ser divididas em seis áreas principais: (1) Indústria, (2) Produtos e serviços, (3) Modelos de negócios e mercado, (4) Economia, (5) Ambiente de trabalho e (6) Desenvolvimento de habilidades. De forma concisa, a Indústria 4.0 possui um grande potencial em diversas áreas, e sua implementação traz impactos abrangentes em toda a cadeia de valor. Isso inclui a melhoria dos processos de produção e engenharia, aprimoramento da qualidade de produtos e serviços, otimização das relações entre clientes e empresas, criação de novas oportunidades de negócios, benefícios econômicos, mudanças nos critérios educacionais e transformação do ambiente de trabalho (Chaves, 2023).

Ivanov *et al.* (2018) exploram a interconexão entre análise de big data, fabricação aditiva, sistemas avançados de rastreamento, Indústria 4.0 e os possíveis efeitos disruptivos nas cadeias de suprimentos, e como a digitalização pode aprimorar o controle sobre esses efeitos em cascata.

A literatura revela uma série de interconexões relevantes no contexto da Indústria 4.0 e sua influência na gestão empresarial. Primeiramente, o nível de transformação digital de uma empresa, como destacado por Machado *et al.* (2019), está intrinsecamente ligado à percepção dos gestores em relação às barreiras da adoção da Indústria 4.0. Isso é particularmente evidente quando se considera a realidade das pequenas e médias empresas na Hungria, onde a resistência dos funcionários e os desafios de gestão média podem dificultar a incorporação das tecnologias da Indústria 4.0, conforme identificado por Horvath *et al.* (2019).

Em um panorama mais amplo, observa-se que a Indústria 4.0 ainda não atingiu plenamente diversos aspectos organizacionais, abrangendo o desenvolvimento de produtos e serviços, o gerenciamento operacional (Frank *et al.*, 2019), a inovação nos modelos de negócios (Nascimento *et al.*, 2018), a inovação nos modelos de negócios (Nascimento *et al.*, 2018). *al.*, 2018) e a gestão da cadeia de suprimentos (Fettermann *et al.*, 2018). A Indústria 4.0, como conceituada, representa uma nova era industrial que combina sistemas de produção e tecnologias de informação e comunicação (TIC), com destaque para a Internet das Coisas (IoT), culminando na formação de sistemas ciber-físicos (CPS), conforme discutido por Jeschke *et al.* (2017). Esses avanços têm como objetivo permitir que as empresas adotem processos de produção flexíveis e analisem grandes volumes de dados em tempo real para aprimorar suas decisões estratégicas e operacionais, conforme defendido por Kagermann *et al.* (2013) e Schwab (2016).

No entanto, como ressaltado por Chaves (2022), a implementação da Indústria 4.0 traz tanto benefícios quanto desafios complexos e muitas vezes imprevisíveis. Por um lado, ela oferece eficiência produtiva, redução de custos, automação avançada e melhorias na qualidade dos produtos. Por outro lado, surgem preocupações sobre a substituição de empregos por automação, questões de segurança cibernética, privacidade de dados e a necessidade de treinamento constante para os trabalhadores. Lidar com esses desafios requer abordagens cuidadosas à medida que a indústria evolui, e a adaptação estratégica é fundamental.

Além disso, é importante destacar que a Indústria 4.0 tem impactos que ainda não foram completamente compreendidos, como transformações sociais, éticas e econômicas, como observado por Chaves (2022). Para aproveitar os benefícios e mitigar os desafios, a sociedade como um todo, incluindo governos e empresas, deve definir papéis cruciais, incluindo a adaptação da educação e treinamento de mão de obra, a promoção da inovação nas empresas e a revisão da regulamentação para se adequarem à nova era industrial. Essas considerações refletem a complexidade e a amplitude dos impactos da Indústria 4.0 na gestão empresarial e na sociedade em geral.

4. Conclusão

As instalações de produção inteligentes possibilitam maior adaptabilidade na produção, a automação do fluxo produtivo, a transferência de informações sobre um item na medida que atravessa a cadeia de produção e a utilização de autômatos configuráveis. Isso viabilizará a fabricação de pequenas séries devido à habilidade de ajustar rapidamente as máquinas para se conformarem às especificidades específicas do cliente. Portanto, essa flexibilidade também estimula a criatividade.

A competência necessária para ajustar de maneira contínua o sistema produtivo representa o fator crítico de sucesso na fabricação. Profissionais capacitados para migrar para a Era 4.0 podem se deparar com um horizonte promissor nos anos subsequentes. As organizações requerem indivíduos dotados de inventividade e capacidade de deliberação, bem como proficiência técnica. Conhecimento é o elemento essencial para acrescentar valor, as inovações tecnológicas trazidas pela Revolução 4.0 apresentam desafios a todas as áreas de conhecimento, notadamente às disciplinas de engenharia.

A engenharia mecânica desempenha um papel central nesse procedimento, uma vez que está profundamente imersa no ambiente fabril. Nesse sentido, a engenharia mecânica e o engenheiro desse campo continuarão a possuir um papel primordial no cenário da Era 4.0. É claro que a inteligência artificial desempenha e desempenhará a função de desempenhar um papel significativo em inúmeras otimizações que irão simplificar e agregar ao cotidiano, não somente do engenheiro, mas da sociedade como um todo.

Entretanto, a importância do elemento humano ainda se manifestará e subsistirá fundamentalmente em graças nas quais a inteligência artificial e demais procedimentos perspicazes não evidenciaram suficiência ou eficácia para suprir os requisitos exigidos. O perito em engenharia mecânica continua a desempenhar um papel e carregar a responsabilidade por várias fases e etapas que somente sua perícia poderá resolver, contudo com diversas tecnologias emergentes da Era 4.0 como parceiras.

Tarefas manuais e repetitivas são rapidamente sendo prematuras por força de trabalho inteligente e automatizada. Consequentemente, serão exigidas novas habilidades e capacidades por parte dos profissionais. Para o engenheiro de mecânica, a Quarta Revolução Industrial não se destina apenas a automatizar as operações, o que resultará na simplificação do seu trabalho, mas também possibilitará que esse profissional alocue seu tempo em outras requisições.

As sugestões para pesquisas futuras incluem o desenvolvimento de programas de capacitação para engenharia mecânica na Indústria 4.0, a integração eficaz de tecnologias na engenharia mecânica, a avaliação dos impactos sociais da automação, a busca por eficiência na produção, e a investigação das implicações de segurança cibernética e ética na Era 4.0. Essas pesquisas podem contribuir para uma transição suave para a Indústria 4.0 e para a maximização de seus benefícios.

Referências

- ABDI. (2017). *Inovação, Manufatura Avançada e o Futuro da Indústria*. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). www.abdi.com.br/Estudo/ABDI_Inovacao_Manufatura_Vol01.pdf.
- Amaral Aies, R. W. *et al.* (2018). Indústria 4.0: desafios e tendências para a gestão do conhecimento. *Revista E-Tech: Tecnologias para Competitividade Industrial*. 11(1), 67-87.
- Barbalho, S. C. M. *et al.* (2015). Análise da aplicação do funil de inovação em empresa de médio porte fabricante de equipamentos odontológicos. In: *Simpósio De Engenharia De Produção*. (22). Bauru. Anais [...] Bauru: 2015.
- Borildo, D. J. A. (2017) *Indústria 4.0: Aplicação a Sistemas de Manutenção*. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/102740/2/181981.pdf>.
- Botelho, L. L. R. *et al.* (2011). O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Gestão e sociedade*. 5(11), 121-136.
- Cavalcanti, L. L.; *et al.* (2017). Futurismo, inovação e logística 4.0: desafios e oportunidades. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, 7.
- Carvalho, L. P. (2021). *Indústria 4.0 e as Inovações para a Engenharia Mecânica. 2021*. N. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Mecânica – Universidade Anhanguera, Santo André, 2021.
- Chaves, K. R. (2022). *A manufatura no contexto dos princípios da indústria 4.0: barreiras e impactos*. Monografia (graduação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica do Curso Superior em Engenharia Mecânica, Vitória, 2022.
- Chiavenato, I. (2009). *Gestão de pessoas*. (3a ed.), Campus.
- Clark, K. B., & Wheelwright, S. C. (1993). *Managing new product and process development: text and cases*. The Free Press.
- CNI (2016). *Industry 4.0: A New Challenge For Brazilian Industry*. Confederação Nacional da Indústria (CNI). https://bucket-gw-cni-static-cmssi.s3.amazonaws.com/media/filer_public/54/02/54021e9b-ed9e-4d87-a7e53b37399a9030/challenges_for_industry_40_in_brazil.pdf.
- CNI (2018). *Mapa Estratégico Da Indústria 2018 - 2022*. Confederação Nacional da Indústria (CNI).
- CNI (2016). *Desafios para indústria 4.0 no Brasil*. Confederação Nacional da Indústria (CNI).
- CONFEA. *Resolução Nº 218, de 29 jun 1973*. <https://normativos.confea.org.br/ementas/visualiza.asp?idEmenta=266>.
- CREA ES. (2019). *Novas tecnologias em pauta na palestra: "O papel do engenheiro na indústria 4.0"*. <http://www.creaes.org.br/creaes/PRINCIPAL/tabid/55/ctl/Details/mid/402/ItemID/7439/Default.aspx>.
- Domingues, L. H. (2020). *Engenharia de produção e a indústria 4.0*. Aya.
- Fetterman, D. *et al.* (2018). How does Industry 4.0 contribute to operations management? *Journal of industrial and Production Engineering* 35 (4), 255–268.
- FIRJAN. *Indústria 4.0: panorama da inovação*. 2016
- Frank, A. G. *et al.* (2019). *Industry 4.0 technologies: implementation patterns in manufacturing companies*. (210), 15-26. *Int. J. Prod. Econ.*
- Freitas F. F. L. (2013). *Gestão da Inovação: teoria e prática para implantação*. Atlas.
- Ganguly, A. (1999). *Business-driven research & development: managing knowledge to create wealth*. West Lafayette: First Ichor Business Books.
- Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. 6. ed. São Paulo: Atlas.
- Gomes, J. D. O. (2016). *Manufatura avançada verde e amarela*. In: Seminário Internacional De Alta Tecnologia, 21. Anais [...]. Piracicaba, 67-80.
- Horvath, D., & Szabo, R.Z. (2019). *Driving forces and barriers of Industry 4.0: do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?* *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 146, 119 – 132.
- Ivanov, D. *et al.* (2018). *The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics*. *Int. J. Prod. Res.* 1–18.
- Kagermann, H., *et al.* (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative industrie 4.0: Securing the Future of German Manufacturing Industry*. Final Report of the Industry 4.0 Working Group. Forschungsunion.
- Kardec, A., & Baroni, J. T. (2002). *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*. Ed. Quality mark.
- Machado, C.G., *et al.* (2019). *Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: challenges and enablers towards increased digitalization*. *Way 1* (2), 3–4.
- Marum, A. M. *et al.* (2022). *Mudanças trazidas pela indústria 4.0 para a área da engenharia mecânica*. *Revista Científica SENAI-SP-Educação, Tecnologia e Inovação*, 1 (1), 106-124.
- Morais, R. R., & Monteiro, R. (2019). *Indústria 4.0: impacto na gestão de operações e logística*. São Paulo: Editora Mackenzie.
- Nascimento, D., *et al.* (2018). *Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: a business model proposal*. *J. Manuf. Technol. Manag* (forthcoming).

Perini, A. V. (2018). *As ferramentas e tecnologias da indústria 4.0 e sua potencial aplicabilidade na manutenção*. Monografia (graduação) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, Coordenadoria de Curso Superior de Engenharia Mecânica.

Rotta, F. (2017). *Indústria 4.0 pode economizar R\$ 73 bilhões ao ano para o Brasil*. ABDI –Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Brasília. <https://www.abdi.com.br/postagem/industria-4-0-pode-economizar-r-73-bilhoes-ao-ano-para-o-brasil>.

Sacomano, J. B. *et al.* (2018). *Indústria 4.0: conceitos e fundamentos*. Blucher.

Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. Genebra: World Economic Forum.

Soares, M. G. (2018). *A Quarta Revolução Industrial e seus possíveis efeitos no direito, economia e política*. 33 f. Tese (Doutorado) -Curso de Direito, Universidade Autónoma de Lisboa. <https://www.migalhas.com.br/arquivos/2018/4/art20180427-05.pdf>.

Souza, M. T. D., & Silva, M. D. D., & Carvalho, R. D. (2010). *Revisão integrativa: o que é e como fazer*. Einstein. 8, 102-106. <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>.

Silva, J. P. E. (2023). *O Impacto Tecnológico Da Indústria 4.0 No Brasil: alguns benefícios, consequências e desafios*. 17 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário, Centro Universitário dos Guararapes. Cabo de Santo Agostinho, Pe.

Tortorella, G., & Fettermann, D. (2018). *Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies*. 56 (8),2975–2987.

Turkes, M.C., *et al.* (2019). *Drivers and barriers in using industry 4.0: a perspective of SMEs in Romania*. Processes; 7 (3), 153.