

Organizadores:

Thiago Santana de Oliveira

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Ronaldo de Jesus Barros

Lilian Barros Santiago

Estudos em
Engenharia
& **Inovação**

Volume 10

Thiago Santana de Oliveira
Mirian Nunes de Carvalho Nunes
Ronaldo de Jesus Barros
Lilian Barros Santiago
(Organizadores)

ESTUDOS EM ENGENHARIA & INOVAÇÃO

VOLUME 10

EDITORA PASCAL
2025

Editor Chefe: Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

Dr. Will Ribamar Mendes Almeida

Dr. Raimundo Luna Neres

Dr. Raimundo José Barbosa Brandão

Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior

Dr. André Leonardo Demaison Medeiros Maia

Dr. Wellinton de Assunção

Dr. Moisés dos Santos Rocha

Dr. José Ribamar Santos Moraes Filho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48c

Coletânea Estudos em engenharia e inovação / Thiago Santana de Oliveira, Mirian Nunes de Carvalho Nunes, Ronaldo de Jesus Barros e Lilian Barros Santiago (Org). São Luís - Editora Pascal, 2025.

471 f. : il.: (Estudos em engenharia e inovação; v. 10)

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-156-9

D.O.I.: 10.29327/5561493

1. Engenharia. 2. Tecnologia. 3. Inovação. 4. Miscelânea. I. Oliveira, Thiago Santana de. II. Nunes, Mirian Nunes de Carvalho. III. Barros, Ronaldo de Jesus. IV. Santiago, Lilian Barros. V. Título.

CDU: 621.7::330.341.1

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2025

APRESENTAÇÃO

Vivemos uma era marcada por transformações tecnológicas profundas, nas quais a Engenharia ocupa posição central no enfrentamento dos novos desafios e na construção de soluções inovadoras. O avanço da Indústria 4.0, com seus sistemas de digitalização, automação e conectividade, está remodelando o cenário produtivo global. Nesse contexto, os profissionais da engenharia são chamados a desenvolver competências técnicas, metodológicas, sociais e pessoais, que os tornem aptos a liderar mudanças e a propor estratégias eficazes frente a um mercado cada vez mais competitivo e dinâmico.

As fábricas inteligentes, capazes de prever falhas, adaptar-se rapidamente às demandas e otimizar seus processos, exigem engenheiros com visão sistêmica e domínio de tecnologias emergentes. Esses profissionais assumem o papel de protagonistas na tomada de decisões estratégicas, na gestão eficiente dos recursos e na promoção da sustentabilidade dentro das organizações.

No Brasil, embora os avanços rumo à Indústria 4.0 ocorram de forma gradual, a transformação digital já se apresenta como uma necessidade urgente. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), boa parte dos setores industriais do país ainda enfrenta atraso na adoção de tecnologias digitais, o que impacta diretamente na produtividade e competitividade. Cabe aos engenheiros impulsionar esse desenvolvimento, difundindo conhecimento técnico-científico, propondo melhorias estruturais e promovendo metodologias de produção inteligente e sustentável.

Foi com esse espírito de inovação, compromisso acadêmico e consciência do papel transformador da engenharia, que surgiu este livro. *Estudos em Engenharia e Inovação* reúne uma coletânea de trabalhos de conclusão de curso (TCC) elaborados por alunos das engenharias da Faculdade Anhanguera de São Luís, Maranhão. A obra contempla temas relevantes nas áreas de engenharia ambiental, engenharia de produção, engenharia mecânica, engenharia elétrica, engenharia química e engenharia de controle e automação, com enfoque em processos produtivos, manutenção industrial, computação, comunicação, redes, Internet das Coisas (IoT), resíduos sólidos, segurança do trabalho, sustentabilidade, projetos e outras áreas afins.

Cada capítulo reflete o esforço investigativo, a capacidade analítica e a criatividade dos futuros engenheiros, oferecendo contribuições significativas para o aprimoramento dos processos industriais e para a construção de um futuro mais tecnológico, sustentável e inovador.

Convidamos você, leitor, a mergulhar neste compêndio de ideias, soluções e perspectivas que traduzem a evolução do pensamento acadêmico e sua aplicabilidade no mundo real. Que esta leitura inspire novos caminhos e fortaleça o compromisso com o desenvolvimento da engenharia brasileira.

Boa leitura!

Eduardo Mendonça Pinheiro

Doutor em Agroecologia, especialista em Engenharia de Produção e professor da Universidade Estadual do Maranhão

ORGANIZADORES

Thiago Santana de Oliveira

Bacharel em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal do Maranhão (2004), com mestrado em Engenharia de Materiais (2016), na mesma instituição. Atuou como profissional nas áreas de siderurgia e gerenciamento de frota de veículos e equipamentos a diesel, com bons conhecimentos nas ferramentas de gestão da manutenção e produção. Ministra aulas desde 2005, sendo a experiência inicial no ensino médio e técnico. Atualmente, trabalha no ensino superior, onde possui experiência de 10 anos, e técnico, ocupando os cargos de docente e coordenador de curso. Responsável pela organização de eventos na instituição e gestão de documentação dos cursos que coordeno. Possui importantes publicações na área.

Mirian Nunes de Carvalho Nunes

Pós-Graduada em Gestão Educacional pela Faculdades Integradas Potencial - FIP - Cotias - SP; em Arte, Educação e Tecnologias Contemporâneas pela Universidade de Brasília - UnB e em Docência do Ensino Superior pela Universidade Candido Mendes RJ. Graduada em Desenho Industrial pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Graduada em Formação Pedagógica de Docentes para as áreas do Ensino Médio e Profissionalizante pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA. Exerço cargo de Professora na Faculdade Anhanguera São Luís - MA, ministrando disciplinas da área de Desenho Técnico em programas computacionais (AutoCAD, Inventor, REVIT). Atuo com apoio à Orientação de TCC. Atuei como Professora EaD pela UEMANET.

Ronaldo de Jesus Barros

Possui formação técnica em Mecânica Industrial pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA (2012); Graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade Pitágoras de São Luís (2019); Especializações em Engenharia de Materiais (2021) e Docência do Ensino Superior (2021), ambas pela Universidade Norte do Paraná. Atualmente (2024), cursa os semestres finais do Bacharelado em Engenharia Civil na Faculdade Anhanguera de São Luís, graduação acelerada devido a aproveitamento de estudos e com conclusão prevista para o primeiro semestre de 2025.

Lilian Barros Santiago

Graduada em Eletrônica Industrial pelo Instituto Federal Educação Ciência e Tecnologia do MA (2004), em Administração pela Universidade Ceuma em 2012 e Formação Pedagógica pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA em 2008. Tem experiência na área de proteção comando e controle no sistema Eletrobras (Eletronorte) onde trabalhei por 15 anos, atualmente sou professora na Faculdade Pitágoras do Sistema Kroton em São Luís do Maranhão onde atua nas áreas de Elétrica e Eletrônica e, no curso de Administração e RH. Atuei como professora no Sistema de Educação a distância do Instituto Federal Maranhão - IFMA no Curso de Segurança do Trabalho. Atuei como professora do Serviço Nacional de Aprendizagem profissional - SENAI-MA de 2012 a 2015. Aliado a essas experiências fiz a pós-graduação em didática universitária na FAMA e, para melhorar a minha performance profissional fiz o curso de formação em coaching pela IBC.

SUMÁRIO

SEÇÃO: ENGENHARIA AMBIENTAL

CAPÍTULO 1	14
CRIMES AMBIENTAIS NO ESTADO DO MARANHÃO: CAUSAS, IMPACTOS E ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO E COMBATE	

Vanderson Ferreira Pacheco

CAPÍTULO 2.....	25
TÉCNICAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	

Max Felipe Ferreira Vale

SEÇÃO: ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

CAPÍTULO 3.....	34
ESTUDO DA AUTOMAÇÃO APLICADA AO SISTEMA RESIDENCIAL	

João Antônio Gomes Filho

CAPÍTULO 4	45
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E A INDÚSTRIA 4.0: A IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA E DA ROBÓTICA NA INDÚSTRIA	

Raniery Santos Diniz

Wagner Elvio de Loiola Costa

CAPÍTULO 5.....	58
INTERNET DAS COISAS APLICADA NA AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL	

Francisnando Lopes Fernandes

George Vagner Silva de Souza

CAPÍTULO 6.....	67
AUTOMAÇÃO E CONTROLE NA INDÚSTRIA 4.0: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA LITERATURA	

Arthur Oliveira Pinheiro

George Vagner Silva de Souza

CAPÍTULO 7.....	78

COMO A AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL TEM UM IMPACTO NA VIDA DOS DEFICIENTES

Marcel Mota Silva

George Vagner Silva de Souza

CAPÍTULO 8	87

ROBÓTICA: ESTUDO DA AUTOMAÇÃO EM CIRURGIAS MÉDICAS

Antônio Marcelo Barros Ribeiro

Paulo José Pinto Souza

SEÇÃO: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CAPÍTULO 9.....	98

IMPORTÂNCIA DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO NA GESTÃO SUSTENTÁVEL NAS INDÚSTRIAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Gustavo Rafael Abreu Pereira

CAPÍTULO 10	107

LOGÍSTICA BRASILEIRA E SUA INFLUÊNCIA NA ENTREGA DOS PRODUTOS

Thayanne Serejo dos Santos

Ramaiany Carneiro Mesquita

CAPÍTULO 11.....	117

ANÁLISE SWOT NO PLANEJAMENTO E ORGANIZAÇÃO DE EMPRESAS

Paulo José Silva da Luz

Felipe Santos

CAPÍTULO 12	127

ABORDAGENS DE GESTÃO DA PRODUÇÃO PARA OTIMIZAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE EQUIPES DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Rogério Silva Rocha

SEÇÃO: ENGENHARIA ELÉTRICA

CAPÍTULO 13	137

A RELAÇÃO ENTRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Alexandre França de Sá

Paulo José Pinto Souza

CAPÍTULO 14.....	149
ENERGIA FOTOVOLTAICA E SUAS VANTAGENS PARA APLICAÇÕES	
<i>Victor Manoel de Sena Sales</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	
 CAPÍTULO 15	 161
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA	
<i>Raunyr Luigy Santos Silva</i>	
 CAPÍTULO 16	 172
ACIONAMENTOS DE MOTORES COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA	
<i>Glecycivan Santos</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	
 CAPÍTULO 17	 185
ESTUDO DO CONVERSOR CA/CC EM LEDS DE POTÊNCIA	
<i>Wenderson Lindoso da Silva</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	
 CAPÍTULO 18	 197
ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA COMO FONTE GERADORA DE ENERGIA NO BRASIL	
<i>Wilton Nairon Silva Teixeira</i>	
 CAPÍTULO 19	 208
A GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA POR MEIO DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA	
<i>Gabriel Menezes Salviano</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	
<i>Lilian Barros Santiago</i>	
 CAPÍTULO 20	 219
RELEVÂNCIA DAS SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO NO TRANSPORTE DE ENERGIA A ELÉTRICA	
<i>Pedro Lucas Costa dos Santos</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	

CAPÍTULO 21	230

A IMPORTÂNCIA DA PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Manoelton Serra Viegas

Lilian Barros Santiago

Paulo José Pinto Souza

CAPÍTULO 22	241

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: INTEGRAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

Daniel Thales Sousa Ferreira

SEÇÃO: ENGENHARIA MECÂNICA

CAPÍTULO 23	253

GESTÃO DA MANUTENÇÃO: A RELEVÂNCIA DA MANUTENÇÃO PRODUTIVA TOTAL (TPM)

Leandro Viana Souza

CAPÍTULO 24	262

O IMPACTO DA TECNOLOGIA E AUTOMAÇÃO NA SOCIEDADE CONTEMPORÂNEA

Benison Victor Barros dos Santos

CAPÍTULO 25	273

ANÁLISE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO EM CALOR E FLUIDOS

Ronaldo Freire Madeira

Antônio Merval Machado Tavares

CAPÍTULO 26	284

CONDIÇÕES E BENEFÍCIOS ASSOCIADOS À MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE CALDEIRAS

Stênio Levy França de Sousa

Ronaldo de Jesus Barros

CAPÍTULO 27	293

O IMPACTO DA ENGENHARIA MECÂNICA NA OTIMIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES

Stefane Thayllon de Barros Maciel

Thiago Santana de Oliveira

CAPÍTULO 28	302
REFRIGERAÇÃO SUSTENTÁVEL: UMA INVESTIGAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, VIABILIDADE ECONÔMICA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E COMERCIAIS DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	
<i>Diego Barbosa Reis</i>	
CAPÍTULO 29	314
PROCESSO DE FABRICAÇÃO: USINAGEM EM TORNO CONVENCIONAL E CNC	
<i>Joacyr Salazar de Albuquerque</i>	
<i>Antônio Merval Machado Tavares</i>	
CAPÍTULO 30	325
A EVOLUÇÃO DOS MOTORES HÍBRIDOS NO SETOR AUTOMOTIVO	
<i>Antônio Jose Rego Lima</i>	
<i>Antônio Merval Machado Tavares</i>	
<i>Paulo José Pinto Souza</i>	
CAPÍTULO 31	337
ESTUDO SOBRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ARCO ELÉTRICO: TIG E MIG/MAG	
<i>Vinicius Moura</i>	
<i>Antônio Merval Machado Tavares</i>	
CAPÍTULO 32	350
GESTÃO DA MANUTENÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0	
<i>Adeilson Rocha Ferreira</i>	
<i>Antônio Merval Machado Tavares</i>	
CAPÍTULO 33	361
MATERIAIS COMPÓSITOS E SUAS TECNOLOGIAS: ÊNFASE A APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AERONÁUTICA	
<i>Raimundo Almiratan Sousa Rodrigues Júnior</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 34	371
PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS	
<i>Hatos Brendo Ribeiro Lima</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	

CAPÍTULO 35	381
MODERNIZAÇÃO NA PRODUÇÃO MECÂNICA: MANUFATURA INTELIGENTE NA TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA EM PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	
<i>Juliberg Almeida da Conceição</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 36	391
MANUFATURA ADITIVA DE METAIS NA INDÚSTRIA 4.0: REVISÃO DE LITERATURA ESTRITA À ADIÇÃO METÁLICA PELO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	
<i>Gilmar dos Anjos Formigosa</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 37	400
USINAGEM CRIOGÊNICA: ÊNFASE ÀS VANTAGENS E DESVANTAGENS FRENTE À USINAGEM COM FLUIDO DE CORTE CONVENCIONAL	
<i>Hudson Berg Gomes Ribeiro</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 38	410
AUTOMATIZAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG: OTIMIZAÇÃO E CONTROLE ROBÓTICO DE PARÂMETROS DE ENTRADA	
<i>Carlos Eduardo Passos da Costa</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 39	422
REQUISITOS DE CARGA E CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS PARA TREM DE POUSO DE AEROMODELO	
<i>Danilo Pereira Cidreira</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	
CAPÍTULO 40	434
USINAGEM A PLASMA: INOVAÇÕES, APLICAÇÕES E POTENCIALIDADES NA INDÚSTRIA MODERNA	
<i>David Weskley Costa Santos</i>	
<i>Ronaldo de Jesus Barros</i>	

CAPÍTULO 41.....	441
ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS NA GESTÃO DA PRODUÇÃO E MANUTENÇÃO	

Romulo Kubitschek de Araujo Ferreira

CAPÍTULO 42.....	450
TORNEAMENTO COM AUXÍLIO ULTRASSÔNICO (TAU): PRINCÍPIOS, UTILIZAÇÕES E VANTAGENS NA USINAGEM	

Welmo de Queiroz Carvalho

Ronaldo de Jesus Barros

SEÇÃO: ENGENHARIA QUÍMICA

CAPÍTULO 43.....	463
PRÁTICAS MODERNAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA COM ÊNFASE EM SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA NO SETOR	

Joeberson Castro Baldez

Engenharia Ambiental

Resumo

Este estudo aborda a problemática dos crimes ambientais no Estado do Maranhão, explorando suas causas, impactos e possíveis estratégias de prevenção e combate. Dada a rica biodiversidade do Maranhão e sua importância estratégica para o equilíbrio ecológico e econômico do Brasil, este trabalho investiga os principais fatores que contribuem para os crimes ambientais, impactando negativamente os ecossistemas e a qualidade de vida das comunidades locais. O objetivo geral é analisar a ocorrência desses crimes, identificar suas principais manifestações e propor medidas eficazes para sua prevenção e combate. A metodologia empregada foi uma revisão bibliográfica abrangente, utilizando fontes dos últimos cinco anos e incluindo dados de artigos, teses e monografias disponíveis em bases como Scielo, Google Acadêmico, entre outros. A pesquisa enfatizou uma abordagem qualitativa e descritiva para detalhar os tipos de crimes ambientais frequentes no Maranhão, como desmatamento ilegal, poluição hídrica e caça de animais silvestres, e as falhas nas políticas de fiscalização e legislação vigente. Os resultados destacam a interligação entre as atividades ilegais e seus impactos devastadores sobre a flora e fauna locais, além das repercussões para a vida das comunidades que dependem desses recursos naturais. Conclui-se que é crucial fortalecer os mecanismos de fiscalização com recursos tecnológicos modernos, como satélites e drones, intensificar a educação ambiental e desenvolver políticas públicas que integrem conservação ambiental com desenvolvimento sustentável. A participação efetiva da sociedade civil, através de ONGs e outras instituições, é essencial para monitorar e denunciar atividades ilegais, promovendo um ambiente de maior proteção aos ricos ecossistemas do Maranhão.

Palavras-chave: Crimes ambientais. Maranhão. Desmatamento. Educação ambiental. Políticas públicas.

Abstract

This study addresses the issue of environmental crimes in the state of Maranhão, exploring their causes, impacts, and possible strategies for prevention and combat. Given Maranhão's rich biodiversity and its strategic importance for Brazil's ecological and economic balance, this work investigates the main factors contributing to environmental crimes, which negatively impact ecosystems and the quality of life of local communities. The general objective is to analyze the occurrence of these crimes, identify their main manifestations, and propose effective measures for their prevention and combat. The methodology employed was a comprehensive bibliographic review, using sources from the last five years, including data from articles, theses, and dissertations available in databases such as Scielo, Google Scholar, among others. The research emphasized a qualitative and descriptive approach to detail the types of environmental crimes frequent in Maranhão, such as illegal deforestation, water pollution, and wildlife poaching, as well as the shortcomings in enforcement policies and current legislation. The results highlight the interconnection between illegal activities and their devastating impacts on local flora and fauna, in addition to the repercussions for the lives of communities that depend on these natural resources. It is concluded that it is crucial to strengthen enforcement mechanisms with modern technological resources, such as satellites and drones, intensify environmental education, and develop public policies that integrate environmental conservation with sustainable development. The effective participation of civil society, through NGOs and other institutions, is essential to monitor and report illegal activities, fostering a greater protection environment for Maranhão's rich ecosystems.

Keywords: Environmental crimes. Maranhão. Deforestation. Environmental education. Public policies.



1. INTRODUÇÃO

O Estado do Maranhão, com sua vasta riqueza natural e diversidade ecológica, enfrenta uma série de desafios ambientais que exigem atenção imediata. Problemas como desmatamento, poluição hídrica, queimadas e degradação dos solos vêm se intensificando nas últimas décadas, resultado do crescimento populacional desordenado, atividades agropecuárias intensivas, expansão urbana e práticas econômicas insustentáveis. Esses fatores, além de causarem danos irreversíveis aos ecossistemas, impactam diretamente a qualidade de vida das populações locais, principalmente as que dependem dos recursos naturais para sua subsistência.

A Amazônia, Cerrado e Mata dos Cocais são biomas de destaque no Maranhão, todos vulneráveis aos processos de degradação ambiental. O desmatamento ilegal para exploração de madeira e a expansão da agropecuária estão entre as principais causas dessa devastação, afetando a biodiversidade e contribuindo para as mudanças climáticas. Além disso, as comunidades ribeirinhas e quilombolas, que historicamente vivem em harmonia com o ambiente, têm enfrentado dificuldades para manter suas práticas sustentáveis devido à crescente pressão econômica e ambiental.

A justificativa para a realização deste estudo reside na importância estratégica tanto para o equilíbrio ecológico do país quanto para a economia regional. O Maranhão possui grande potencial para o desenvolvimento sustentável, desde que sejam adotadas práticas que conciliem preservação ambiental com desenvolvimento econômico. A pesquisa contribuirá para a identificação de estratégias eficazes de prevenção e combate à degradação ambiental, oferecendo subsídios para políticas públicas e ações comunitárias voltadas à conservação dos recursos naturais e à melhoria da qualidade de vida das populações locais.

Diante do contexto de degradação ambiental no estado do Maranhão, caracterizado pelo aumento do desmatamento, da poluição e da caça ilegal de animais silvestres, surge a seguinte questão: Quais são os principais fatores que contribuem para a ocorrência de crimes ambientais no estado do Maranhão e como essas práticas impactam os ecossistemas locais e a qualidade de vida das comunidades afetadas?

O objetivo geral deste estudo foi analisar a ocorrência de crimes ambientais no Estado do Maranhão, investigando suas causas, impactos e consequências para o meio ambiente e a sociedade local. Os objetivos específicos são identificar os principais tipos de crimes ambientais cometidos no estado do Maranhão; descrever o papel dos órgãos ambientais e das autoridades responsáveis pela fiscalização na prevenção e combate aos crimes ambientais no estado. E por fim, apresentar medidas e estratégias eficazes para prevenir e combater os crimes ambientais no estado do Maranhão, visando a proteção do meio ambiente e a promoção do desenvolvimento sustentável.

O proposto tratou-se de uma revisão bibliográfica que foi extraída de matérias já publicadas, utilizou-se para tanto o método qualitativo e descritivo. A busca foi realizada por meio dos seguintes buscadores Scientific Electronic Library Online (SciELO), Revista Científica de Engenharia Ambiental, Google Acadêmico e Scribd. Os critérios de exclusão: textos incompletos, artigo que não abordaram diretamente o tema do presente estudo e nem os objetivos propostos, foram consultados ainda diferentes documentos como: Livros, Teses, Artigos e Monografia: desde o ano 2018 até 2023. Foram selecionados trabalhos publicados nos últimos 05 anos, na língua portuguesa. Os principais autores foram Moura (2019), Carvalho (2018), Ribeiro (2020), Gomes e Pereira (2019). Os descritores utilizados na pesquisa

foram: Maranhão, Impacto Ambiental, Desmatamento, Estratégias de conservação, Desenvolvimento Sustentável.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 Principais tipos de crimes ambientais cometidos no estado do Maranhão

De acordo com Oliviera (2018) os crimes ambientais no Maranhão têm se tornado uma preocupação crescente, especialmente em áreas ricas em biodiversidade, como a Amazônia e o Cerrado. Entre os principais crimes estão o desmatamento ilegal, a poluição dos recursos hídricos e a caça ilegal de animais silvestres. Essas atividades estão interligadas e causam danos irreversíveis ao meio ambiente e à qualidade de vida das populações que dependem desses ecossistemas. Diversos autores têm abordado a questão, destacando as causas, os impactos e as possíveis soluções para mitigar esses crimes.

Segundo Silva (2019), o desmatamento ilegal no Maranhão é impulsionado principalmente pela expansão agropecuária, que muitas vezes ocorre de maneira descontrolada e sem respeito às áreas de preservação ambiental. A exploração da madeira e a criação de pastos para o gado são algumas das práticas que levam à destruição de grandes áreas de floresta. O autor destaca que, apesar de existirem leis que visam à proteção dessas áreas, a fiscalização é insuficiente e frequentemente falha.

Além disso, Santos e Almeida (2020) afirmam que o desmatamento ilegal tem impactos diretos na fauna e flora locais, levando à perda de biodiversidade e à alteração dos ciclos ecológicos. A destruição dos habitats naturais faz com que várias espécies entrem em risco de extinção, incluindo algumas endêmicas da região. Para os autores, o combate ao desmatamento deve passar pela educação ambiental das comunidades e pela implementação de práticas agroecológicas sustentáveis.

A poluição dos recursos hídricos é outro crime ambiental recorrente no Maranhão. De acordo com Moura e Costa (2021), a contaminação dos rios e lagoas é causada principalmente pelo despejo de resíduos industriais e pelo uso indiscriminado de agrotóxicos em atividades agrícolas. Esses poluentes afetam a qualidade da água e comprometem a saúde das populações que dependem desses recursos para consumo e pesca. Os autores sugerem que a adoção de tecnologias limpas e o fortalecimento da fiscalização poderiam minimizar os danos causados pela poluição.

Oliveira (2018) também ressalta o papel das atividades mineradoras na degradação dos recursos hídricos do estado. A mineração, em particular a exploração de bauxita e ouro, gera resíduos tóxicos que são frequentemente despejados nos cursos d'água, contaminando não apenas a água, mas também o solo e os organismos aquáticos. O autor sugere a criação de políticas públicas mais rigorosas para controlar a atuação das empresas mineradoras na região.

A caça ilegal de animais silvestres é um dos crimes ambientais mais graves e menos discutidos no Maranhão. Conforme Nascimento (2020), a prática é motivada principalmente pelo comércio ilegal de espécies exóticas e pela subsistência de populações que dependem da caça para alimentação. No entanto, essa atividade tem levado à extinção de diversas espécies e ao desequilíbrio dos ecossistemas locais. O autor argumenta que a solução passa pela criação de alternativas econômicas para as comunidades envolvidas na caça.

Outro ponto abordado por Barbosa (2019) é a ineficácia das políticas de conservação da fauna no estado. Mesmo com a criação de unidades de conservação e a implementação de leis de proteção, a falta de recursos e a corrupção dentro dos órgãos de fiscalização impedem que a caça ilegal seja efetivamente controlada. O autor defende que um maior investimento em infraestrutura e treinamento de fiscais poderia aumentar a eficiência no combate a esse crime.

Carvalho e Lima (2020) acrescentam que a caça ilegal não afeta apenas as espécies diretamente visadas, mas também causa impactos indiretos em outras espécies que dependem daquelas caçadas para sua alimentação ou reprodução. O efeito cascata gerado pela retirada de predadores ou presas do ecossistema pode levar a desequilíbrios ecológicos que são difíceis de reverter. Os autores propõem a realização de campanhas educativas voltadas para a conscientização das comunidades locais.

A legislação ambiental no Maranhão, embora avançada em alguns aspectos, ainda apresenta falhas. Segundo Fernandes (2019), o principal problema reside na aplicação das leis, uma vez que as penalidades para crimes ambientais são frequentemente brandas ou não aplicadas. Para o autor, a criação de um sistema judiciário mais eficiente, com julgamentos rápidos e punições exemplares, seria essencial para desincentivar a prática de crimes como o desmatamento e a caça ilegal.

Ribeiro (2021) enfatiza a importância da fiscalização para a prevenção de crimes ambientais. No entanto, ele destaca que os recursos destinados aos órgãos de controle ambiental no Maranhão são insuficientes, e a corrupção torna difícil a aplicação efetiva das leis. O autor sugere que parcerias com organizações não governamentais (ONGs) e o uso de tecnologias como drones e satélites poderiam melhorar a vigilância nas áreas mais remotas.

Para Souza e Andrade (2020), a falta de planejamento urbano também contribui para os crimes ambientais no estado. A expansão desordenada das cidades, sem a devida consideração pelos impactos ambientais, leva à destruição de áreas naturais e à poluição dos recursos hídricos. Os autores defendem que uma abordagem integrada, que considere tanto o desenvolvimento econômico quanto a preservação ambiental, é necessária para evitar que esses crimes se agravem.

A caça ilegal e o desmatamento também estão interligados. Martins (2021) observa que a destruição das florestas facilita o acesso dos caçadores a áreas anteriormente inexploradas, aumentando a pressão sobre as populações de animais silvestres. Além disso, o desmatamento abre caminho para atividades como a agricultura e a pecuária, que contribuem para a degradação dos ecossistemas locais. O autor recomenda a implementação de corredores ecológicos como uma solução para preservar as áreas de floresta remanescentes e reduzir o impacto da caça.

Alves e Pereira (2018) apontam que o turismo ambiental pode ser uma estratégia eficiente para combater os crimes ambientais no Maranhão. Segundo os autores, o desenvolvimento do ecoturismo poderia gerar renda para as comunidades locais, reduzindo sua dependência de atividades predatórias como a caça e o desmatamento. Além disso, o turismo sustentável incentiva a conservação dos recursos naturais, já que esses se tornam um ativo econômico.

Conforme Lima (2021), uma das estratégias de prevenção mais eficazes é a educação ambiental. O autor argumenta que as escolas e universidades desempenham um papel crucial na formação de uma consciência ambiental crítica entre os jovens, que são os futuros responsáveis pela preservação dos recursos naturais. Campanhas de conscientização e projetos de extensão voltados para as comunidades rurais também são apontados como

soluções viáveis.

Vieira (2020) destaca a necessidade de colaboração entre o governo, a sociedade civil e as empresas privadas para combater os crimes ambientais no Maranhão. Para o autor, a criação de redes de cooperação pode aumentar a eficiência das ações de fiscalização e promover o desenvolvimento de práticas sustentáveis nas diversas atividades econômicas do estado. Essa cooperação é vista como fundamental para a criação de um ambiente onde o desenvolvimento e a preservação caminhem juntos.

2.2 O papel dos órgãos ambientais e das autoridades responsáveis pela fiscalização na prevenção e combate aos crimes ambientais no estado

Segundo Silva (2019), o Maranhão, devido à sua vasta área florestal e rica biodiversidade, enfrenta altos índices de crimes ambientais, como o desmatamento ilegal e a caça predatória. O autor afirma que a atuação do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA) tem sido insuficiente, principalmente pela falta de recursos financeiros e humanos. A presença desses órgãos é fundamental para monitorar e fiscalizar as atividades econômicas, mas a defasagem no número de fiscais dificulta uma atuação eficiente.

De acordo com Santos e Almeida (2020), a estrutura das instituições responsáveis pela fiscalização ambiental é insuficiente para cobrir todo o território maranhense, especialmente nas áreas mais remotas. O estudo aponta que a falta de veículos e equipamentos tecnológicos modernos torna a fiscalização lenta e ineficiente. Além disso, a corrupção e a interferência política afetam negativamente o trabalho das autoridades ambientais, reduzindo a aplicação de sanções e multas.

Oliveira (2018) discute o papel das autoridades policiais na repressão aos crimes ambientais no Maranhão, destacando a atuação da Polícia Militar Ambiental. Embora o estado tenha criado batalhões especializados na proteção ambiental, a quantidade de recursos alocados é insuficiente para realizar um trabalho contínuo e abrangente. O autor sugere que parcerias com órgãos federais, como o IBAMA, e com ONGs ambientais poderiam fortalecer a fiscalização.

Outro aspecto abordado por Nascimento (2020) é a necessidade de capacitação contínua dos agentes fiscalizadores. Segundo o autor, muitos fiscais carecem de conhecimento técnico e de recursos para identificar corretamente os crimes ambientais. Ele propõe a criação de programas de treinamento e a introdução de novas tecnologias, como drones e satélites, para monitorar áreas de difícil acesso.

Barbosa (2019) enfatiza a importância da colaboração entre diferentes esferas do governo e as comunidades locais no combate aos crimes ambientais. A autora argumenta que, sem o apoio da população, os órgãos ambientais têm dificuldades para obter informações sobre as atividades ilegais que ocorrem em áreas remotas. Ela sugere que a criação de conselhos comunitários e a implementação de programas de conscientização ambiental poderiam contribuir para o aumento da vigilância e denúncia dos crimes.

Segundo Costa e Ribeiro (2018), as políticas públicas voltadas para a fiscalização ambiental no Maranhão precisam ser reformuladas para atender às demandas atuais. O estudo aponta que a legislação existente é muitas vezes inadequada ou desatualizada, o que dificulta a penalização de infratores. Além disso, os autores destacam que, embora existam leis rigorosas, sua aplicação é ineficaz devido à sobrecarga dos órgãos fiscalizadores.



A questão do financiamento também é destacada por Fernandes (2019). O autor afirma que os órgãos ambientais no Maranhão sofrem com a escassez de recursos financeiros, o que limita suas operações. Para ele, é essencial que o governo estadual aumente os investimentos em fiscalização ambiental e que haja uma gestão mais eficiente dos recursos já disponíveis. A criação de fundos específicos para a proteção ambiental seria uma solução viável para garantir a continuidade das ações de fiscalização.

Lima e Souza (2021) argumentam que a educação ambiental é uma ferramenta poderosa para prevenir crimes ambientais. Segundo os autores, a falta de conhecimento da população sobre as consequências das atividades ilegais, como desmatamento e poluição de rios, contribui para a persistência desses crimes. Os órgãos ambientais, em parceria com as escolas e universidades, poderiam desenvolver projetos educativos que incentivassem a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais.

O papel da SEMA no Maranhão é detalhado por Moura (2019), que enfatiza a necessidade de modernização das práticas de fiscalização e gestão ambiental. O autor menciona que a utilização de tecnologias geoespaciais, como o monitoramento por satélite, poderia melhorar significativamente a detecção de desmatamentos e outras atividades ilegais. Moura também sugere que a integração entre os órgãos estaduais e federais poderia potencializar os resultados das ações de fiscalização.

Segundo Carvalho (2018), a criação de áreas de proteção ambiental (APAs) no Maranhão tem sido uma estratégia eficaz para preservar regiões de interesse ecológico, mas a falta de fiscalização nessas áreas torna o esforço insuficiente. O autor destaca que, mesmo em áreas protegidas, o desmatamento ilegal e a caça ainda ocorrem com frequência, o que revela a fragilidade das políticas de controle ambiental.

A Polícia Federal também desempenha um papel importante na investigação e repressão de crimes ambientais no Maranhão. Conforme expõe Silveira (2020), operações conjuntas entre a Polícia Federal e o IBAMA têm resultado em algumas das maiores apreensões de madeira ilegal na história do estado. No entanto, a autora ressalta que essas ações são esporádicas e não suficientes para reverter a tendência de desmatamento, que muitas vezes envolve redes criminosas organizadas.

Gomes e Pereira (2019) abordam o impacto das mudanças climáticas sobre os esforços de fiscalização ambiental no Maranhão. Eles argumentam que o aumento da temperatura global e a alteração dos padrões climáticos têm intensificado a pressão sobre os recursos naturais do estado, especialmente na Amazônia Legal. Isso torna ainda mais urgente a necessidade de fortalecer os órgãos ambientais e criar políticas públicas que integrem a proteção ambiental com o combate às mudanças climáticas.

A morosidade do sistema judiciário é outro problema identificado por Ribeiro (2020). O autor destaca que muitos crimes ambientais permanecem impunes devido à lentidão no julgamento dos processos e à aplicação de penas brandas. Ele sugere que o fortalecimento das varas especializadas em crimes ambientais e a agilidade no julgamento desses casos são essenciais para coibir práticas ilegais.

Por fim, Vieira (2020) defende que a participação das ONGs na fiscalização ambiental pode ser um fator crucial para o sucesso na preservação dos recursos naturais no Maranhão. O autor argumenta que as organizações não governamentais possuem flexibilidade e conhecimento técnico que complementam o trabalho dos órgãos oficiais, além de desempenharem um papel importante na conscientização das comunidades locais.

2.3 Medidas e estratégias eficazes para prevenir e combater os crimes ambientais no Estado do Maranhão

Segundo Santos e Ribeiro (2020), uma das principais estratégias para prevenir crimes ambientais no Maranhão é o fortalecimento da fiscalização ambiental, com a utilização de tecnologias de monitoramento, como drones e satélites, que permitem o controle em tempo real das áreas mais vulneráveis ao desmatamento e outras infrações. O uso de imagens de satélite, por exemplo, tem se mostrado fundamental para identificar áreas desmatadas ilegalmente, possibilitando uma ação rápida por parte dos órgãos ambientais.

Silva (2019) reforça a importância da modernização das instituições de fiscalização, como o IBAMA e a Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA). O autor destaca que a formação contínua de fiscais ambientais e o aprimoramento de suas capacidades técnicas são essenciais para garantir uma fiscalização eficaz. Além disso, ele propõe que os órgãos ambientais devem investir em parcerias com universidades e institutos de pesquisa para desenvolver novas tecnologias de monitoramento e controle.

Uma abordagem eficaz discutida por Carvalho e Souza (2021) envolve o aumento das penalidades para os crimes ambientais, tornando-as mais severas e dissuasivas. Os autores argumentam que a legislação atual não é suficiente para coibir as práticas ilegais, sendo necessária uma reformulação das leis, com aplicação de multas mais altas, prisão efetiva para os responsáveis e maior agilidade nos processos judiciais relacionados aos crimes ambientais.

De acordo com Nascimento (2020), a criação de unidades de conservação e áreas protegidas no Maranhão tem sido uma das estratégias mais eficazes para a preservação ambiental. No entanto, ele alerta que a criação de novas áreas protegidas deve vir acompanhada de uma fiscalização mais rigorosa para garantir que essas áreas não sejam invadidas por atividades ilegais, como a extração de madeira e a caça. O autor sugere também que as comunidades locais devem ser envolvidas na gestão dessas áreas para aumentar sua eficácia.

Lima (2021) argumenta que a educação ambiental é uma das ferramentas mais poderosas para prevenir crimes ambientais a longo prazo. O autor destaca que a conscientização da população, especialmente em áreas rurais, sobre a importância da preservação ambiental e os danos causados pelos crimes ambientais pode reduzir significativamente a ocorrência dessas práticas. Campanhas de educação ambiental em escolas e comunidades têm o potencial de transformar a relação das pessoas com o meio ambiente.

No contexto do desenvolvimento sustentável, Oliveira e Barbosa (2019) propõem que iniciativas de ecoturismo sejam incentivadas como uma forma de desenvolvimento econômico sustentável no Maranhão. O ecoturismo, segundo os autores, não só gera emprego e renda para as populações locais, mas também incentiva a conservação dos recursos naturais, uma vez que esses se tornam um ativo econômico. Programas de ecoturismo, quando bem implementados, podem substituir atividades predatórias como o desmatamento e a caça ilegal.

Costa e Ferreira (2018) sugerem que políticas públicas que integrem o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental são essenciais para combater os crimes ambientais. Eles afirmam que é necessário promover incentivos econômicos para práticas sustentáveis na agricultura e pecuária, como o uso de técnicas agroecológicas que minimizem o impacto ambiental. Essas práticas, quando adotadas em larga escala, podem contribuir para a redução do desmatamento e a preservação dos recursos hídricos.

A necessidade de maior participação da sociedade civil no combate aos crimes am-



bientais é destacada por Vieira (2020). O autor enfatiza que ONGs e movimentos sociais desempenham um papel fundamental na fiscalização e denúncia de práticas ilegais. Ele sugere que o governo do Maranhão estabeleça canais de comunicação mais acessíveis para que a população possa denunciar crimes ambientais de forma segura e eficiente, além de promover parcerias mais robustas com organizações não governamentais.

Moura (2019) aborda a importância do zoneamento ecológico-econômico (ZEE) como uma medida estratégica para orientar o uso sustentável do território no Maranhão. O ZEE permite a definição de áreas apropriadas para diferentes tipos de atividades econômicas, preservando regiões ecologicamente sensíveis e garantindo que o desenvolvimento ocorra de forma planejada e sustentável. Segundo o autor, a implementação de um ZEE eficaz pode prevenir conflitos ambientais e reduzir a pressão sobre os ecossistemas.

Gomes (2020) destaca a implementação de políticas de compensação ambiental como uma estratégia eficaz para a conservação. Segundo o autor, as empresas que causam impactos ambientais significativos, como a mineração e a agropecuária, devem ser obrigadas a compensar esses danos por meio de ações de reflorestamento e recuperação de áreas degradadas. As políticas de compensação podem ser uma forma de garantir que as atividades econômicas ocorram sem comprometer a sustentabilidade ambiental.

Para Fernandes e Alves (2021), a integração entre os diversos níveis de governo – federal, estadual e municipal – é essencial para o sucesso das políticas de combate aos crimes ambientais. A falta de coordenação entre esses entes muitas vezes resulta em duplicidade de esforços ou na ausência de fiscalização em áreas críticas. Os autores propõem a criação de conselhos interinstitucionais para promover a cooperação entre os diferentes órgãos envolvidos na gestão ambiental.

O uso de incentivos financeiros para promover práticas sustentáveis é defendido por Pereira e Souza (2019). Eles sugerem que o governo do Maranhão crie subsídios para agricultores que adotem práticas agrícolas sustentáveis, como a agrofloresta e a agricultura orgânica. Esses incentivos poderiam reduzir a pressão sobre as florestas, além de aumentar a produtividade de forma sustentável, promovendo o desenvolvimento econômico sem comprometer os recursos naturais.

Rodrigues (2018) propõe que as empresas que atuam no estado do Maranhão adotem políticas de responsabilidade socioambiental mais rigorosas, alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável. Ele sugere que as corporações sejam incentivadas a investir em práticas de produção mais limpas e na compensação de seus impactos ambientais, promovendo um equilíbrio entre a exploração dos recursos e sua preservação.

Por fim, Silveira (2020) destaca a importância da participação das comunidades locais na gestão ambiental, especialmente em áreas de grande biodiversidade. Segundo o autor, as populações que vivem nessas áreas são os primeiros a sofrer os impactos dos crimes ambientais, e, portanto, devem ser integradas como protagonistas nas estratégias de prevenção e combate a essas práticas. O envolvimento comunitário pode ser realizado por meio de projetos de manejo sustentável e pela formação de guardiões ambientais, que atuariam na proteção das áreas vulneráveis.

Em síntese, a prevenção e o combate aos crimes ambientais no Maranhão demandam uma abordagem multifacetada, que integre ações de fiscalização, educação ambiental, desenvolvimento sustentável e maior participação da sociedade civil. A implementação dessas estratégias pode contribuir para a proteção do meio ambiente e a promoção de um desenvolvimento econômico mais justo e sustentável no estado.

3. CONCLUSÃO

A análise detalhada da revisão literária abordou a problemática dos crimes ambientais no Maranhão revelou uma realidade complexa e multifacetada, que demanda ações concretas e coordenadas para sua resolução. Os resultados da pesquisa confirmaram que o desmatamento ilegal, a poluição dos recursos hídricos e a caça ilegal são os principais crimes que afetam significativamente a biodiversidade e a sustentabilidade ambiental da região. Estes impactos não só comprometem a integridade ecológica do Maranhão, mas também afetam diretamente a qualidade de vida das comunidades locais que dependem desses recursos naturais.

Os objetivos estabelecidos foram alcançados com sucesso, onde se identificaram os tipos predominantes de crimes ambientais, se delineou o papel crítico das autoridades ambientais e se apresentaram estratégias efetivas para combater e prevenir essas infrações. A implementação de tecnologias modernas como drones e satélites para monitoramento e a maior integração entre órgãos governamentais e a sociedade civil foram destacadas como medidas essenciais para aprimorar a fiscalização e a aplicação das leis ambientais.

É evidente que, além da necessidade de fortalecer a legislação e a capacidade de fiscalização, é fundamental promover uma maior conscientização sobre a importância da preservação ambiental entre os moradores do estado. Campanhas educativas e a inclusão de programas de educação ambiental nas escolas surgem como ferramentas poderosas para moldar uma cultura de respeito e cuidado com o meio ambiente, potencializando o desenvolvimento sustentável do Maranhão.

Conclui-se, portanto, que a luta contra os crimes ambientais no Maranhão requer uma abordagem holística que englobe ações de prevenção, fiscalização e educação, com a participação ativa de todos os setores da sociedade. Somente através de uma cooperação robusta e um comprometimento com políticas públicas eficazes será possível assegurar a preservação dos valiosos recursos naturais do estado, garantindo um futuro próspero e sustentável para as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. P., & PEREIRA, R. T. Turismo sustentável como alternativa para o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental. **Revista de Ecoturismo**, 12(3), 45-60.2018
- BARBOSA, M. A. Unidades de conservação e a ineficácia das políticas de proteção da fauna no Maranhão. **Revista Brasileira de Conservação Ambiental**, 8(2), 35-48.2019
- CARVALHO, F. L. Áreas de proteção ambiental no Maranhão: Desafios e oportunidades para a fiscalização ambiental. **Revista de Conservação Ambiental**, 12(1), 80-97.2018
- CARVALHO, L. S., & LIMA, F. R. Impactos indiretos da caça ilegal sobre a biodiversidade: Uma análise ecossistêmica. **Revista de Ecologia Aplicada**, 14(1), 72-88. 2020
- CARVALHO, R. A.; SOUZA, E. V A atuação do IBAMA e da SEMA no combate ao desmatamento ilegal no Maranhão. **Revista Brasileira de Fiscalização Ambiental**, 10(1), 45-63. 2020
- COSTA V. F.; FERREIRA, L.V A capacitação dos agentes de fiscalização ambiental no Maranhão: Uma análise das necessidades e avanços. **Revista de Direito Ambiental**, 6(3), 120-138. 2018
- COSTA, A. P., & RIBEIRO, L. M. Políticas públicas e fiscalização ambiental no Maranhão: Um estudo sobre as lacunas na legislação. **Revista de Políticas Públicas e Gestão Ambiental**, 5(4), 15-32.2018
- FERNANDES, R. M. A aplicação das leis ambientais no Maranhão: Desafios e perspectivas. **Revista de Direito Ambiental**, 6(4), 101-119.2019
- GOMES, T. L., & PEREIRA, R. J. Mudanças climáticas e a intensificação dos crimes ambientais no Maranhão.



Revista Brasileira de Climatologia e Meio Ambiente, 9(1), 43-60. 2019

LIMA, A. R. Educação ambiental como ferramenta de prevenção de crimes ambientais no Maranhão. **Revista de Educação e Sustentabilidade**, 9(1), 29-45.2021

LIMA, S. V., & SOUZA, F. G. Educação ambiental como ferramenta de prevenção de crimes ambientais: Estudo de caso no Maranhão. **Revista de Educação e Sustentabilidade**, 10(1), 23-41.2021

MARTINS, P. F. Inter-relações entre desmatamento e caça ilegal no bioma amazônico no Maranhão. *Revista de Biodiversidade e Conservação*, 11(3), 51-67.2021

MOURA, L. H. A modernização da fiscalização ambiental no Maranhão: Tecnologias e desafios. **Revista de Gestão Ambiental e Tecnologia**, 11(2), 75-91.2019

MOURA, S. L., & COSTA, P. J. Poluição hídrica no Maranhão: Impactos da agricultura e da indústria sobre os recursos hídricos. **Revista de Gestão Ambiental**, 15(2), 115-134.2021

NASCIMENTO, V. R. A caça ilegal de animais silvestres no maranhão: um estudo sobre as motivações e impactos ambientais. **Revista de Direito Ambiental e Desenvolvimento**, 10(2), 87-99.2020

OLIVEIRA, F. C. O papel da mineração na degradação dos recursos hídricos no estado do Maranhão. *Revista de Geociências e Meio Ambiente*, 14(2), 201-218.2018

RIBEIRO, A. L. Corrupção e falta de fiscalização no combate aos crimes ambientais no Maranhão. **Revista de Políticas Públicas e Gestão Ambiental**, 7(1), 33-49.2021

RIBEIRO, J. T. Morosidade judicial e impunidade nos crimes ambientais no Maranhão: Uma abordagem crítica. **Revista de Direito Ambiental**, 9(4), 105-123.2020

RODRIGUES J. R. Financiamento das ações de fiscalização ambiental no Maranhão: Análise e propostas de melhoria. **Revista de Sustentabilidade e Meio Ambiente**, 7(3), 99-116.2020

SANTOS, M. A., & ALMEIDA, C. R. Desafios da fiscalização ambiental no Maranhão: Limitações e propostas de reformulação institucional. **Revista de Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 14(3), 88-107.2019

SANTOS, M. A., & ALMEIDA, J. C. Desmatamento ilegal no Maranhão: Causas, impactos e soluções sustentáveis. **Revista de Geografia e Meio Ambiente**, 13(4), 96-112. 2020

SILVA, J. R. Expansão agropecuária e desmatamento no estado do Maranhão: Uma análise crítica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 10(3), 22-39.2019

SILVEIRA, M. T. Operações conjuntas da Polícia Federal e do IBAMA no Maranhão: Resultados e desafios. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, 8(4), 78-94.2020

SOUZA, T. P., & ANDRADE, G. M. A influência do planejamento urbano na degradação ambiental: O caso do Maranhão. **Revista de Urbanismo Sustentável**, 8(1), 47-63.2020

VIEIRA, M. C. Colaboração entre governo e sociedade civil no combate aos crimes ambientais no Maranhão. **Revista de Gestão e Políticas Públicas**, 5(2), 70-85.2020



TÉCNICAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

SOLID WASTE MANAGEMENT TECHNIQUES IN CIVIL CONSTRUCTION

Max Felipe Ferreira Vale

2

Resumo

O problema abordado neste trabalho foi o gerenciamento inadequado de resíduos sólidos produzidos pela construção civil e os impactos ambientais e socioeconômicos associados ao descarte inadequado desses materiais. O objetivo geral deste estudo foi chegar a uma conclusão de como os resíduos impactam o meio ambiente e propuseram maneiras de corrigir as ações e abordagens anteriores adotando soluções para minimizar os danos. A pesquisa foi baseada na revisão da literatura existente, com a análise de obras publicadas em artigos, teses e dissertações científicas dos últimos anos. O estudo visou descobrir quais tipos de resíduos são produzidos, como eles são gerenciados e quais são as abordagens para a reutilização ou reciclagem desses materiais. Com base nas considerações finais, sugere-se que a implementação de políticas públicas eficazes e a conscientização dos funcionários da construção civil sobre a importância da redução, reutilização e reciclagem de resíduos podem levar a uma redução significativa dos danos ambientais. Além do exposto, a pesquisa destacou a importância da educação ambiental e da cooperação entre o setor privado e público na adoção das práticas sustentáveis visando a economia circular. Assim, pode-se concluir que, por meio da adoção de boas práticas, é possível minimizar os impactos ambientais e contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor.

Palavras-chaves: Resíduos. Construção. Gerenciamento. Sólidos. Civil.

Abstract

The problem addressed in this work was the inadequate management of solid waste produced by the construction industry and the environmental and socio-economic impacts associated with the improper disposal of these materials. The overall aim of this study was to reach a conclusion about how waste impacts the environment and to propose ways of correcting previous actions and approaches, adopting solutions to minimize the damage. The research was based on a review of existing literature, analyzing works published in scientific articles, theses and dissertations in recent years. The study aimed to find out what types of waste are produced, how they are managed and what the approaches are to reusing or recycling these materials. Based on the final considerations, it is suggested that implementing effective public policies and making construction workers aware of the importance of reducing, reusing and recycling waste can lead to a significant reduction in environmental damage. In addition to the above, the research highlighted the importance of environmental education and cooperation between the public and private sectors in adopting sustainable practices aimed at the circular economy. It can therefore be concluded that, by adopting good practices, it is possible to minimize environmental impacts and contribute to the sustainable development of the sector.

Keywords: Waste. Construction. Management. Solid. Civil.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil, essencial para o desenvolvimento econômico e urbano, gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos, cujas consequências ambientais são preocupantes. A disposição inadequada desses resíduos pode suceder em problemas como poluição do solo e da água, enchentes e proliferação de vetores de doenças. A falta de organização no gerenciamento dos entulhos oriundos das obras não apenas agrava a situação ambiental, mas também estabelece custos altos à sociedade e às administrações públicas.

Perante esse cenário, justifica-se a realização deste estudo, que tende abordar o desperdício de materiais na construção civil. A gestão inócua dos resíduos sólidos compromete a saúde pública e apresenta um desafio ao desenvolvimento sustentável.

Ao executar práticas de gerenciamento adequadas, é possível mitigar os impactos negativos e proporcionar uma convivência harmoniosa entre a construção civil e o meio ambiente, beneficiando o bem-estar social.

O problema de pesquisa que norteia esta investigação é: quais as consequências de um mau gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil sobre o meio ambiente? Essa questão é fundamental para compreender os impactos adversos que uma gestão ineficiente pode acarretar e para enfatizar a necessidade de soluções efetivas.

O objetivo geral deste artigo é investigar e propor estratégias inovadoras para a gestão eficiente de resíduos sólidos na construção civil, com foco na promoção da sustentabilidade e na minimização dos impactos ambientais associados às práticas de construção. Para isso, os objetivos específicos são descrever os tipos de resíduos sólidos gerados na construção civil, analisar os impactos ambientais decorrentes desses resíduos e compreender os planos de gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil para sua atenuação.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Para a obtenção de informações, foram escolhidos artigos científicos, teses, dissertações e outros materiais pertinentes publicados nos últimos dez anos, de 2013 a 2024, com o objetivo de assegurar a atualidade das informações e debates apresentados. Para a escolha dos materiais, foram utilizados os seguintes critérios de inclusão: artigos em português e inglês que tratassem diretamente do tema da gestão de resíduos sólidos e sua relação com práticas sustentáveis. Artigos de revisão, resumos e impressões iniciais foram descartados, pois o objetivo do estudo era analisar estudos completos e empíricos.

O Google acadêmico, SciELO, periódicos da CAPES e repositórios de teses e dissertações de universidades brasileiras foram as bases de dados empregadas na pesquisa. Os termos utilizados nas pesquisas foram: administração de resíduos sólidos, sustentabilidade, práticas ecológicas, eficácia na administração de resíduos e reciclagem no Brasil. Estas palavras-chave foram selecionadas para cobrir a extensão do assunto e assegurar que as pesquisas encontradas estivessem diretamente ligadas ao objetivo do estudo.

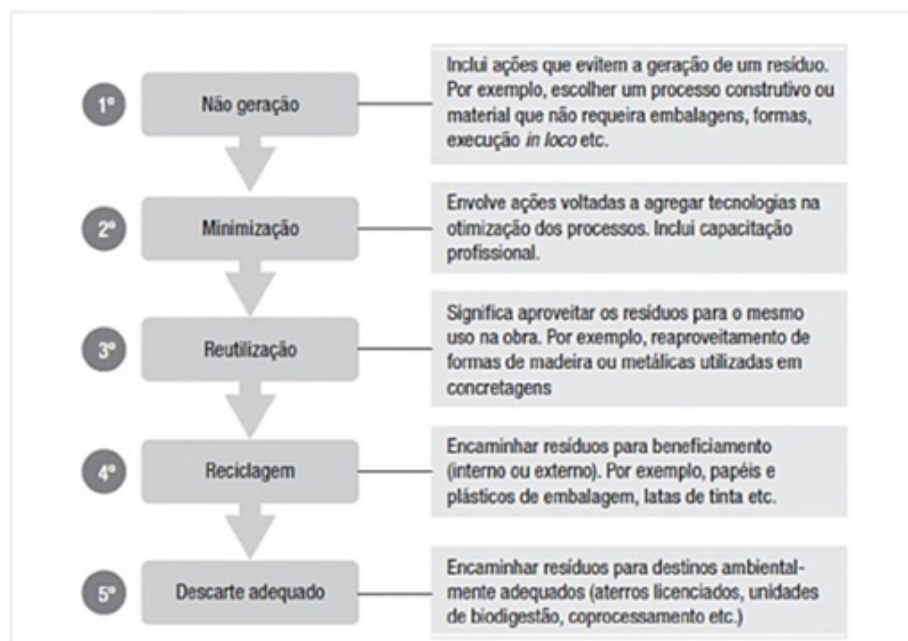
Esta abordagem possibilitou uma avaliação detalhada da literatura existente, oferecendo uma perspectiva completa das práticas vigentes e das lacunas que ainda precisam ser investigadas na área de gestão de resíduos sólidos, especialmente no que se refere à eficácia e à sustentabilidade.



2.2 Resultados e Discussão

De acordo com Nagalli (2002, p. 7) a construção civil é uma grande geradora de resíduos. O gerenciamento de resíduos nas construções civis tem por intuito assegurar a correta gestão dos resíduos durante as atividades cotidianas de execução das obras e dos serviços de engenharia. Ele se fundamenta essencialmente nas estratégias de não geração, minimização, reutilização, reciclagem e descarte adequado dos resíduos sólidos, primando pelas estratégias de redução de geração de resíduos na fonte, como ilustra a figura 1.

Figura 1. Hierarquia do sistema de gerenciamento de resíduos.



Fonte: Adaptado, Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.

Associação Brasileira de Reciclagem de Resíduos Construção Civil e Demolição - ABRECON - estima que, por ano, cerca de 33 mil (trinta e três mil) toneladas de resíduos de construção são coletadas no Brasil. Esta grande quantidade de desperdício é causada principalmente pela falta de serviços o acúmulo e a situação precária das áreas de armazenamento final, que as tornam urgentes implementação de políticas para reduzir o volume de resíduos sólidos de construção e ruína (BLUEMENSCHIN, 2004).

A administração dos resíduos sólidos envolve atividades como a coleta, transferência, tratamento, reciclagem, recuperação de recursos e a destinação final desses materiais nas áreas urbanas. Essa tarefa é uma das principais atribuições das administrações municipais e requer um serviço multifacetado, que demanda habilidades organizacionais, técnicas e gerenciais, além de uma colaboração eficaz entre diversos atores dos setores público e privado (BARROS, 2012).

Segundo Nagalli (2002, p. 7) Os resíduos sólidos de construções civis encontram-se em todas as classes de obras e são os responsáveis por 50% dos resíduos que são gerados em todo o país. São resultantes de construções, reformas, reparos e demolição de obras de construção civil, e os frutos da elaboração e da escavação de terrenos, como por exemplo tijolos, segmentos de cerâmicas, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados entre vários outros.

A constituição dos resíduos sólidos da construção civil são agrupados pelas classes A, B, C e D. A composição dos resíduos classificados pela classe A são elementos que podem ser reciclados ou reaproveitados como adjunto em obras de infraestrutura, edificações e

leira de obras, exemplos; telhas, tijolos, argamassas etc. Os resíduos de classe B são materiais que podem ser reciclados e obter outra destinação, como ser transformados em vidro, gesso, madeira, plástico, papelão e outros. A classe C são pontos para os quais são inexistência ou não executal a execução econômica para a restauração ou reciclagem, como estofados, lixas, panos etc. A classe D é caracterizada como compostos ou em contato de materiais/substâncias nocivos à saúde, por exemplo solvente e tintas, telhas e materiais de amianto, entulho de reformas em clínicas e instalações industriais que possam estar contaminados (CARDOSO, 2009).

Diante da geração dos resíduos sólidos produzidos, e evidente que as agregações por resíduos sólidos são compostos pelos mesmos. As indústrias de construções civis são uma das mais graves práticas para o progresso sociável e econômico, contudo, comporta-se de forma como imensa geradora de impactos ambientais, pelo fato da consumação dos bens naturais, ou alteração de paisagens ou pela criação de resíduos (SILVA, 2007).

Conforme Schneider (2003), os resíduos de construção e demolição (RCD) habitados em locais inapropriados, podem poluir o solo, deterioram paisagens que podem estar modificando nossas vidas mais relevantes e formam uma enorme cominação à saúde pública. O acúmulo de resíduos de construção civil em locais impróprios atrai resíduos que não são inertes, concedendo, nessa ordem, água, alimento e abrigo. Tornando-se espaços ecológicos de diversas espécies de hospedeiros de patogênicos como por exemplos ratos, moscas, vermes, fungos, vírus entre outros.

Para Pinto (2005), a escassez de eficiência, ou em qualquer outro caso, a não presença de políticas que determinam a ordem e as séries do destino dos resíduos sólidos da construção civil nas cidades, agregado com o descumprimento dos geradores no manuseio e no destino dos resíduos, provocam os posteriores impactos ambientais: degradação das áreas de manancial e de proteção permanente, proliferação de agentes transmissores de doenças, assoreamento de rios e córregos, obstrução dos sistemas de drenagem, tais como piscinões, galerias, sarjetas, ocupação de vias e logradouros públicos por resíduos, com prejuízo à circulação de pessoas e veículos, além da própria degradação da paisagem urbana, existência e acúmulo de resíduos que podem gerar risco por sua periculosidade entre outros (PINTO, 2005).

Ainda segundo Pinto (2005), diante do cenário caótico de pôr de lançar de forma inadequada os RCC nas zonas urbanas, as autoridades públicas municipais atuam frequentemente com padrões paliativos, procedendo sistemas de recolhimento e assumindo com os gastos de deslocamento e da acomodação final, assim sendo, não há um método cabal para a problemática de limpeza urbana, por não atingir a mudança da integridade dos resíduos. Dessa forma desigual, estimula a continuidade da acomodação dos resíduos irregular nas localidades deferidos pela limpeza pública da administração municipal.

O gerenciamento de resíduos representa um complexo de gestão que tem por finalidade diminuir, reutilizar ou reciclar resíduos, englobando o planejamento, consciência, métodos e recursos para fortalecer os atos necessários a execução das fases previstas em programas e planos. O reaproveitamento dos resíduos produzidos nas atividades de construção civil podem ser reutilizados de diversos modos, que podem ir desde a reutilização na respectiva obra, de forma que as fases de forma e desforma de organização em que a madeira pode ser empregue por diversas vezes, em acontecimentos de primordiedade de enchimento de entulhos produzidos podem ser utilizado (CAIXA, 2005).

Para que a gestão de resíduos na construção civil seja eficaz, é essencial que os colaboradores compreendam as razões por trás da adoção de certas práticas na obra. A Educação Ambiental tem como foco principal promover a participação e o engajamento da

comunidade, por meio da divulgação e assimilação de conceitos e ações, visando induzir dinâmicas sociais. Isso promove uma abordagem colaborativa e crítica das realidades socioambientais, além de proporcionar uma compreensão autônoma e inovadora dos problemas enfrentados e das soluções viáveis para esses desafios (LEME, CORRÊA DA SILVA, 2010).

A educação ambiental oferece a oportunidade de conscientizar os indivíduos, à medida que são apresentadas informações sobre como suas ações impactam o meio ambiente (FRIGO, SILVEIRA, 2012). A conscientização dos participantes deve ocorrer por meio de palestras, treinamentos, dinâmicas e outras metodologias educativas que promovam a adaptação do comportamento das pessoas aos objetivos estabelecidos. Essas iniciativas educacionais precisam ser implementadas ao longo de todo o processo de desenvolvimento.

Para evitar o descarte inadequado e consequências subsequentes, é necessário evitar o descarte inadequado. Em relação aos impactos ambientais, socioeconômicos e à saúde, a Lei 12.305/2010 dispõe: Todas as operações em aterros e locais perigosos devem ser concluídas (BRASIL, 2010).

Segundo Cardoso (2006), é necessário compreender as influências ambientais. Para determinar a prioridade de quais recursos são limitados, é necessário saber como ecoar. Por onde começar a ação. O primeiro passo é reconhecer os elementos do ambiente. Não existe qualquer exigência de resíduos, necessária para a emissão da Resolução do Conselho de Ministros n.º 307/2012. Conama. Portanto, este assunto está dividido entre gestão de resíduos, destinação e incineração. resíduos, bem como o manuseio de materiais perigosos e sua eliminação. Cardoso (2006), para evitar uma gestão inadequada de resíduos e a consciência negativa que isso pode trazer, é essencial adotar práticas de gestão ecologicamente corretas, baseadas em legislação válida e em princípios de sustentabilidade. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010, traz diretrizes para minimizar os impactos ambientais, socioeconômicos e de saúde associados à gestão inadequada de resíduos.

A legislação estipula que todos os processos realizados em aterros e locais classificados como perigosos devem seguir procedimentos específicos para evitar contaminação e poluição, além de garantir operações que garantam que este quadro legal procura promover e limitar a reutilização e reciclagem de resíduos e promover um círculo econômico que prioriza a conservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente (BRASIL, 2010).

As vantagens do gerenciamento dos resíduos pode-se ressaltar a escolha dos resíduos, evitando a sua a mistura dos seus compostos com os elementos das obras, produzindo economia, que é muito importante para a redução dos desperdícios, proporcionando o reuso das matérias nas próprias obras, antes mesmo de estarem descartados, limitando, dessa forma, os gastos finais da entidade (CARDOSO, 2009).

A administração de resíduos sólidos na indústria da construção civil obedece a um conjunto de normas que visam reduzir os efeitos negativos no meio ambiente. Estes programas de gestão visam diminuir a produção de resíduos na origem, incentivar o reaproveitamento de materiais e a correta reciclagem. “A administração de resíduos é um sistema complexo que visa reduzir, reaproveitar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, consciência, técnicas e recursos” (Cardoso, 2009). Contudo, a implementação eficaz desses planos se depara com obstáculos como a falta de sensibilização e a falta de estímulos financeiros, o que dificulta a adoção mais extensa de práticas sustentáveis.

Segundo Fernandes (2014), A implementação de um PGRS eficiente inicia-se com

a compreensão dos diversos tipos de resíduos produzidos nas atividades de construção, reforma e demolição. Como já foi mencionado, esses resíduos podem ser categorizados de várias maneiras, incluindo os inertes (como tijolos, pedras e concreto) e os não inertes (materiais contaminantes, como tintas, solventes e amianto). Cada categoria de resíduo demanda uma estratégia apropriada, seja para a diminuição da sua geração, para a reciclagem ou para a disposição final.

Ademais, a efetividade dos planos de gestão está atrelada à presença de políticas governamentais e à infraestrutura requerida para a correta disposição dos resíduos. “A falta de políticas públicas bem definidas para a administração de resíduos sólidos, juntamente com a inação dos produtores, intensifica os efeitos nocivos ao meio ambiente” (Pinto, 2005).

Para a efetividade dos planos, é crucial a colaboração entre empresas e governos, investindo em treinamento e tecnologias que possibilitem o reaproveitamento de materiais e a redução dos efeitos no meio ambiente (SILVA, 2007).

3. CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo investigar e sugerir métodos inovadores para a administração eficaz de resíduos sólidos na indústria da construção, com ênfase na promoção da sustentabilidade e na diminuição dos efeitos ambientais provocados pelas operações do setor. A avaliação possibilitou um entendimento mais preciso das principais origens de resíduos, suas categorizações e as consequências danosas do descarte impróprio para o meio ambiente e a comunidade. Por meio de uma extensa revisão de literatura, conseguimos reconhecer as práticas vigentes e as falhas nas políticas públicas e nos procedimentos de gestão de resíduos, particularmente em zonas urbanas.

Os objetivos definidos foram atingidos ao debater a relevância de uma administração eficiente para reduzir a produção de resíduos e incentivar o reaproveitamento e a reciclagem no ramo da construção civil. O problema de pesquisa, que tratava das repercussões de um manejo inadequado de resíduos sólidos, foi solucionado ao longo do estudo, ressaltando as consequências ambientais, tais como a contaminação do solo, a sedimentação de rios e a disseminação de vetores de enfermidades. Contudo, algumas restrições surgiram, como a ausência de informações específicas sobre as políticas municipais de gestão de resíduos, o que pode ter limitado uma avaliação mais minuciosa do desempenho dos governos locais.

Sugere-se que pesquisas futuras intensifiquem a pesquisa sobre a execução de planos de gestão de resíduos sólidos específicos para variados cenários urbanos, bem como investiguem soluções tecnológicas que possam ser implementadas de maneira mais eficiente e acessível. A implementação de políticas públicas mais estritas e a promoção de práticas ecológicas nas construções são etapas cruciais para o aprimoramento constante da administração de resíduos sólidos no setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

A. V. B. Fernandes, J. R. R. Amorim; **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Disponível no endereço eletrônico: < <https://www.scielo.br/j/ce/a/8v5c-GYtby3Xm3Snd6NjNdtQ/> > (Acessado em 02.Nov.2024).

CABRAL, B. E. Antonio. **Manual sobre os resíduos sólidos da construção civil**. SinduconCE. Disponível no



endereço eletrônico: <http://www.ibere.org.br/anexos/325/2664/manual-de-gestao-de-residuos-solidos---ce-pdf>> (Acessado em 10.Set.2024).

CARDOSO, M. Luisa. **Tudo sobre os resíduos sólidos na construção civil**. Sienge plataforma. Disponível no endereço eletrônico: <<https://www.sienge.com.br/blog/residuos-solidos-da-construcao-civil/>> (Acessado em 10.Set.2024).

FERREIRA, Ana, L. C; **Gestão dos Resíduos Sólidos na Construção Civil: Um estudo de caso na REGAP**. Disponível no endereço eletrônico: < https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9LEQ6H/1/joined_document_3.pdf> (Acessado em 04. Nov.2024).

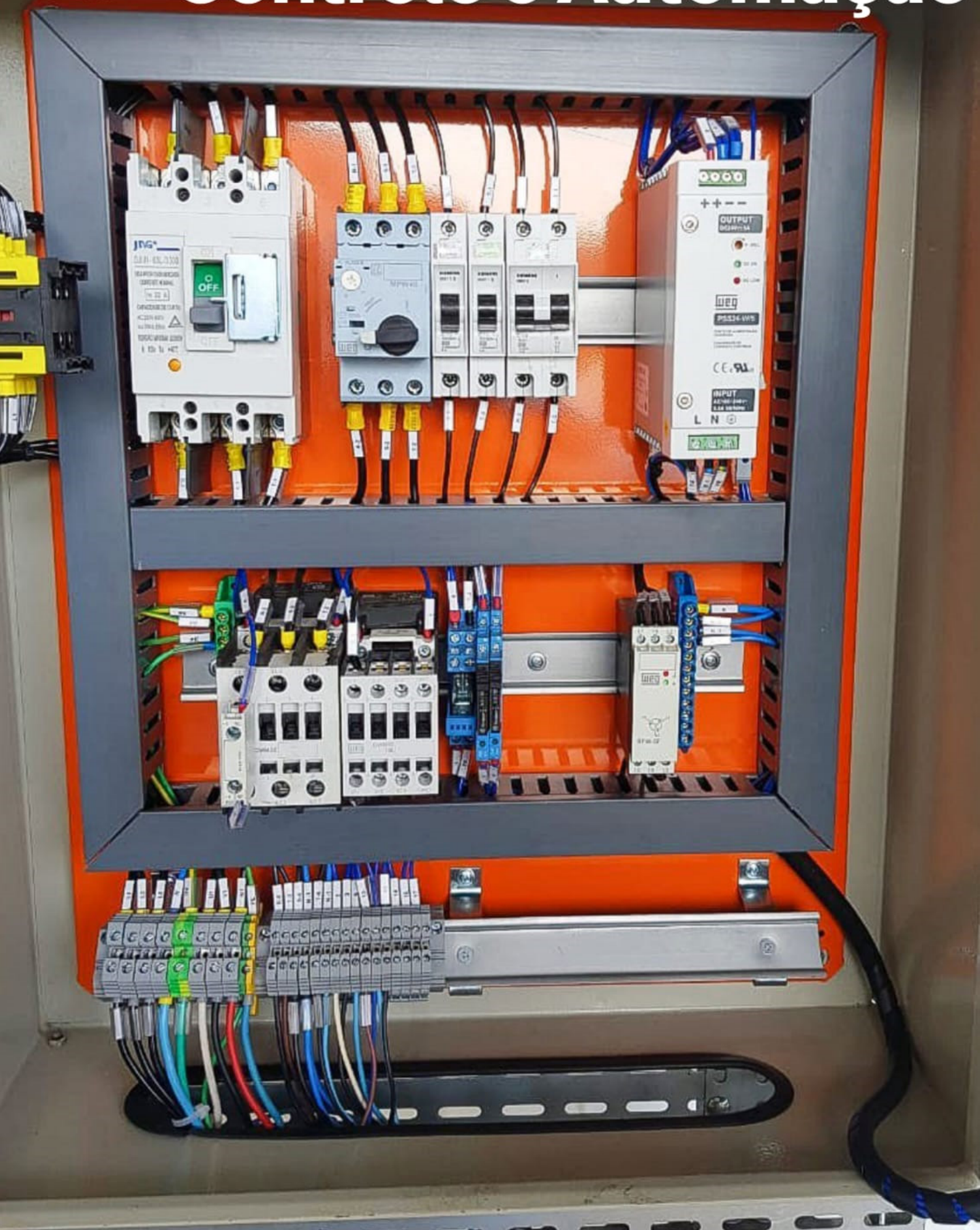
NAGALLI, André. **Gerenciamento dos resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo, oficina de textos, 2014. Disponível no endereço eletrônico: <https://books.google.com.br/books?id=ebcWDAAAQBAJ&printsec=copyright&hl=pt-BR&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false> (Acessado em 10. Set.2024).

OLIVEIRA, Bianca, A; **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. Disponível no endereço eletrônico: < https://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/GERENCIAMENTO_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_NA_CONSTRUCAO_CIVIL.pdf>. Acessado em 30.Out.2024).

SANTOS, Rayla; Aragão, F, Simas. **resíduos sólidos da construção civil e seus impactos no meio ambiente**. https://servicos.unitoledo.br/repositorio/bitstream/7574/235/1/Santos_Aragao_2017.pdf> (Acessado em 14.Set.2024).

SILVA, Iara L; Filho, A. T. C; Reis, J. C; **Plano de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil: um caso em santarém pará, brasil**. Disponível no endereço eletrônico: <http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_20160919144717000000782.pdf> (Acessado em 15.Set.2024).

UMADA, Murilo, K; **Etapas do Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**.



Resumo

O referido artigo apresenta uma pesquisa ampla a respeito de controle de equipamentos em automação residencial, ou domótica, para isso iniciou-se uma abordagem histórica que vai desde o surgimento desta tecnologia, a sua evolução até o que ela representa no cenário atual. O tema em estudo é de vital importância e compreensão devido a crescente evolução desses sistemas, viabilizando a questão da segurança e praticidade proporcionadas as pessoas. Após a contextualização dessa tecnologia vamos evidenciar os principais protocolos utilizados na domótica e suas particularidades e apresentar os principais sistemas de segurança implementados nessa tecnologia. As principais metodologias adotadas foram através de pesquisas bibliográficas em artigos, revistas, dissertações e livros, que foi executável uma visão ampla dos tipos de controle e protocolos utilizados na domótica, bem com os aspectos gerais dos sistemas de controle de automação industrial aplicável. O estudo mostrou que cada sistema de automação residencial tem suas particularidades juntamente com a função de cada protocolo. Por fim, os objetivos foram alcançados dentro das ideias proposta uma vez que se pôde mostrar os protocolos e sistemas que fazem a domótica possível, juntamente com essa tecnologia com realidade inevitável e que trouxe um ambiente inteligente, proporcionando comodidade

Palavras-chave: Automação Residencial. Domótica. Residencial Inteligente.

Abstract

This article presents broad research on equipment control in home automation, or domotics. To this end, a historical approach was initiated that goes from the emergence of this technology, its evolution to what it represents in the current scenario. The topic under study is of vital importance and understanding due to the increasing evolution of these systems, enabling the issue of safety and practicality provided to people. After contextualizing this technology, we will highlight the main protocols used in domotics and their particularities and present the main security systems implemented in this technology. The main methodologies adopted were through bibliographical research in articles, magazines, dissertations and books, which made it possible to execute a broad view of the types of control and protocols used in domotics, as well as the general aspects of the applicable industrial automation control systems. The study showed that each home automation system has its particularities along with the function of each protocol. Finally, the objectives were achieved within the proposed ideas since it was possible to show the protocols and systems that make home automation possible, together with this technology with inevitable reality and that brought an intelligent environment, providing convenience.

Keywords. Home Automation. Home Automation. Smart Home.



1. INTRODUÇÃO

A automação residencial tem ganhado destaque à medida que a tecnologia avança e se torna mais acessível. Ela engloba uma variedade de sistemas e dispositivos que podem ser controlados e monitorados de forma centralizada, geralmente através de smartphones, tablets ou assistentes de voz. Essa automação abrange desde a iluminação e controle de temperatura até a segurança e entretenimento em residências (Cardozo, 2017).

A automação residencial oferece uma série de vantagens aos moradores que a adotam, incluindo facilidade de comunicação, segurança, entretenimento, além de um foco especial no conforto e na eficiência energética. À medida que a tecnologia se torna cada vez mais integrada à vida cotidiana das pessoas, esses benefícios têm impulsionado a busca por residências que estejam preparadas para incorporar essas inovações (Carvalho; Junior, 2019).

A aplicação da automação em residências tem demonstrado que é possível aprimorar diversos aspectos, como o gerenciamento técnico, o conforto, a economia de energia, a prevenção de acidentes e falhas em equipamentos, além de proporcionar maior segurança aos moradores. Também conhecida como Domótica, Residência Inteligente ou Casa do Futuro, a Automação Residencial engloba a implementação de serviços e tecnologias com o objetivo de tornar a moradia mais automatizada, proporcionando maior segurança, conveniência e conforto (Batista; Ramos; Tavares, 2014).

A relevância para a realização deste estudo se baseia na crescente demanda por soluções tecnológicas que tornem nossas casas mais inteligentes e conectadas, otimizando o uso de recursos e proporcionando maior comodidade aos seus habitantes. Além disso, a automação residencial pode contribuir para a redução dos impactos ambientais, ao possibilitar o controle mais preciso e eficiente dos dispositivos elétricos e sistemas de climatização, e para o aumento da segurança, através da integração de sistemas de vigilância e alarmes.

Com o progresso tecnológico, as pessoas estão constantemente em busca de comodidade, praticidade e segurança em suas casas. A automação residencial tem ganhado destaque no mercado não apenas por sua modernidade, mas também por sua capacidade de otimizar o uso dos recursos naturais, o que resulta em economia para os moradores. Portanto, a questão que surge é: Quais são os benefícios de adotar um sistema de automação residencial?

O objetivo geral da pesquisa foi estudar a evolução tecnológica da domótica, destacando as vantagens e desvantagens de sua utilização. Já os objetivos específicos foram: Apresentar uma contextualização sobre a automação residencial (domótica). E por fim demonstrar as contribuições que podem ser proporcionados pela utilização da domótica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Metodologia

A metodologia adotada neste estudo seguiu uma abordagem qualitativa descritiva, baseada em revisão de literatura. Esse método foi selecionado por permitir a síntese de informações já existentes e a construção de análises a partir do levantamento teórico sobre o tema. Para a execução do trabalho, foi realizada uma ampla busca por artigos científicos,

livros e monografias disponíveis em plataformas como Google Acadêmico, SciELO, Lilacs, além de bancos de teses e dissertações de universidades brasileiras. O período considerado para a seleção das publicações foi de 2014 a 2024, visando garantir atualidade e relevância na análise dos conteúdos. Foram priorizados estudos que apresentassem discussões sobre automação residencial (domótica), consultando também livros de autores renomados, como Santos e Delfino (2019), Carvalho e Junior (2019) e Cardozo (2017), para enriquecer o embasamento teórico.

Na seleção dos materiais, foram aplicados critérios de inclusão e exclusão para assegurar a qualidade das fontes analisadas. Foram incluídos estudos revisados por pares, publicados em português e inglês, que abordassem diretamente a temática da automação residencial e suas tecnologias emergentes. Por outro lado, foram excluídos materiais anteriores a 2014, exceto aqueles considerados clássicos fundamentais, e estudos que não apresentassem relevância para o foco desta pesquisa. Após a seleção, procedeu-se com uma leitura analítica detalhada, buscando extrair conceitos e teorias que contribuíssem para a resposta à questão de pesquisa apresentada.

2.2 Resultados e Discussão

A automação residencial, também conhecida como domótica, é um processo que envolve a automatização de uma residência, proporcionando maior conforto e conveniência aos seus moradores (Carvalho; Junior, 2019). De acordo com Santos (2019), esse setor tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos, com uma ampla gama de ofertas que têm sido bem recebidas pelos consumidores. A automação residencial refere-se a qualquer sistema que auxilie as pessoas em suas atividades diárias, seja em vendas, na indústria ou em suas casas.

A Revolução Industrial, que teve início no século XVIII, impulsionou ainda mais a automação, resultando na mecanização que foi incorporada aos processos produtivos. Na década de 1970, surgiu uma tecnologia chamada X-10, que permitiu a comunicação entre aparelhos e luzes. Nas décadas de 1990, campanhas publicitárias contribuíram para popularizar essa tecnologia de automação residencial (Santos; Delfino, 2019).

Praticamente todos os processos mecânicos e eletrônicos em uma residência podem ser otimizados para melhor desempenho por meio da automatização. Ao longo dos anos, as casas têm se tornado mais tecnológicas, com a expectativa de que a tecnologia facilite todas as operações do cotidiano (Rodrigues, 2018). A tecnologia tornou o controle eletrônico das residências acessível a um custo cada vez menor. A maneira como a eletrônica é integrada às casas torna-se um fator crucial para obter um controle automatizado eficiente (Batista; Ramos; Tavares, 2014).

Um sistema típico em uma residência inclui elementos de áudio e vídeo, aquecimento e refrigeração, comunicação e segurança. No entanto, com a domótica, esses sistemas podem ser facilmente acessados e controlados a partir de vários locais na casa, permitindo monitorar e ajustar as condições de forma conveniente, até mesmo remotamente, usando a Internet das Coisas ou dispositivos móveis (Rodrigues, 2018).

A tecnologia, em geral, é desenvolvida para proporcionar conforto e praticidade às pessoas. O avanço contínuo da tecnologia oferece amplas possibilidades, e os sistemas de automação são um reflexo disso (Santos; Delfino, 2019). Um sistema domótico pode ser definido como aquele que, por meio de uma rede de comunicação, integra diversos dispositivos e sistemas para coletar dados sobre o ambiente residencial e tomar ações de

supervisão e gerenciamento. Na figura 1 tem-se o esquema de Sistema Domotizado.



Figura 1. Demonstração de um Sistema Domotizado

Fonte: Vargas (2018)

Esses sistemas podem ser categorizados em dois grupos: sistemas de tecnologia distribuída e sistemas de tecnologia centralizada. Nos sistemas de tecnologia distribuída, cada dispositivo possui sua própria automação e se comunica através de uma rede para atender às necessidades do sistema domótico. Já nos sistemas de tecnologia centralizada, um elemento central é responsável pelo controle e processamento dos sinais de todos os dispositivos do sistema (Carvalho; Junior, 2019).

Através da domótica, é possível transformar residências em ambientes altamente automatizados e integrados, proporcionando maior conforto e conveniência. É possível programar a casa para atender às necessidades dos moradores, mesmo quando estão ausentes, como ajustar a temperatura, programar o preparo de alimentos e muito mais (Rodrigues, 2018).

A tecnologia oferece diversas vantagens, como a redução de custos, aumento da segurança, eficiência energética e valorização do imóvel. A automação residencial avançada está gradativamente modificando a forma como as casas são projetadas, construídas e utilizadas, tornando-as mais práticas e sustentáveis (Batista; Ramos; Tavares, 2014).

Os sistemas domóticos consistem em uma rede de comunicação que permite a interconexão de diversos dispositivos e sistemas, coletando informações sobre a residência e seus espaços, e tomando medidas para supervisionar e gerenciar esses ambientes (Batista; Ramos; Tavares, 2014). De acordo com Vargas (2018), a tecnologia domótica se baseia na conexão de dispositivos que automatizam tarefas domésticas, simplificando a vida das pessoas, promovendo a comunicação, aumentando a segurança e o conforto.

Dispositivos como detectores, sensores e atuadores trocam informações entre si ou com centrais inteligentes, desencadeando ações e emitindo sinais para controlar aparelhos e sistemas, além de fornecer informações e exceções (Santos; Delfino, 2019).

Graças a essa tecnologia, é possível integrar e conectar vários tipos de instalações, proporcionando uma mudança significativa em seu funcionamento. A informação coletada por sensores e outros dispositivos pode ser acessada e manipulada por meio de uma

rede interna na residência ou prédio (Vargas, 2018).

A automatização de processos e serviços tem se tornado cada vez mais comum, expandindo-se das indústrias para residências, meios de transporte e situações privadas. Essa técnica, impulsionada pela Internet das Coisas (IoT), oferece praticidade, supervisão e segurança, como, por exemplo, o acionamento de luzes em um cômodo com facilidade e controle remoto (Neto; Júnior; Carneiro, 2018).

Para que essa automação funcione, é essencial que os dispositivos estejam conectados à internet, permitindo a comunicação com o smartphone. Sem essa conexão, os aparelhos não são detectados na rede, o que impede o acionamento e o monitoramento eficaz dos equipamentos (Santos; Delfino, 2019).

2.2.1 Benefícios da Utilização da Domótica

As residências inteligentes têm como propósito simplificar e aprimorar a vida das pessoas por meio de diversos aspectos, com o conforto sendo um dos mais destacados e cruciais para a sociedade. Além do conforto, a automação residencial proporciona eficiência na área de segurança, no gerenciamento e economia de energia, na regulação do ambiente interno, na irrigação adequada de jardins, e em muitos outros aspectos que visam tornar a vida dos moradores mais conveniente (Cardozo, 2017).

Além disso, a capacidade de reconfigurar tarefas previamente programadas permite a adaptação às novas necessidades dos residentes, tornando a gestão centralizada mais flexível e adaptável. Isso evidencia que essa tecnologia foi desenvolvida para atender às demandas dos usuários e não apenas para servir às máquinas (Cunha, 2018).

Neste contexto, Domingues e Pina (2015, p. 69) observam que:

Cada nova tecnologia traz consigo um conjunto de terminologias novas. Quando se trata de residências inteligentes, não é diferente: termos como casa automatizada, casa inteligente, automação residencial, retrofitting, domótica, entre outros, são comuns. No entanto, todos esses conceitos podem ser resumidos em uma única palavra: conforto. Se um sistema eletrônico instalado em um ambiente não proporcionar conforto ao usuário, ele será desativado e ignorado em questão de semanas. A vida já é complicada o suficiente com senhas, chaves e botões adicionais. Os dispositivos devem simplificar os controles e os processos, tornando tudo mais fácil. No entanto, é crucial que o desejo do usuário seja priorizado, em vez do desejo do computador. A automação residencial pode ser útil em tarefas diárias que consomem tempo ou para eliminar preocupações, como lembrar de fechar as janelas quando a previsão do tempo indicou chuva. O quanto a automação pode ser benéfica para o usuário dependerá do estilo de vida, das preferências pessoais e dos recursos disponíveis.

A automação residencial demonstra de maneira eficaz o conforto que pode proporcionar, pois permite a programação das atividades diárias para tornar a vida em casa mais conveniente. Exemplos incluem a configuração de caminhos de iluminação ao chegar em casa, o desligamento automático de todas as luzes ao dormir, a ativação do sistema de irrigação do jardim se não choveu no dia anterior e o controle da temperatura da água do aquecedor para garantir um banho agradável (Neto; Júnior; Carneiro, 2018).

De acordo com Peronio e Bastos (2017), a domótica é um processo ou sistema que visa melhorar o estilo de vida das pessoas, proporcionando maior conforto, segurança e eficiência energética em suas residências. Isso é alcançado por meio de um controle centrali-

zado das funções da casa, como água, luz, telefone, sistemas de segurança, entre outros. Cunha (2018) também destaca que, além do status, praticidade e conforto, outros fatores, como segurança, economia de energia e valorização do imóvel, têm sido considerados nas decisões de implementar um sistema de automação residencial.

Essas assistentes de voz permitem que os usuários realizem uma variedade de serviços e tarefas específicas, diferenciando-se pela forma como interagem, seja por meio de aplicativos dedicados ou integrados em plataformas. Esses dispositivos têm a capacidade de enviar mensagens ditadas pelo usuário, realizar chamadas telefônicas, ajustar a temperatura ambiente, controlar persianas e acender as luzes, entre outras ações (Ayres, 2019). Na figura 2 tem-se o esquema Domotico.

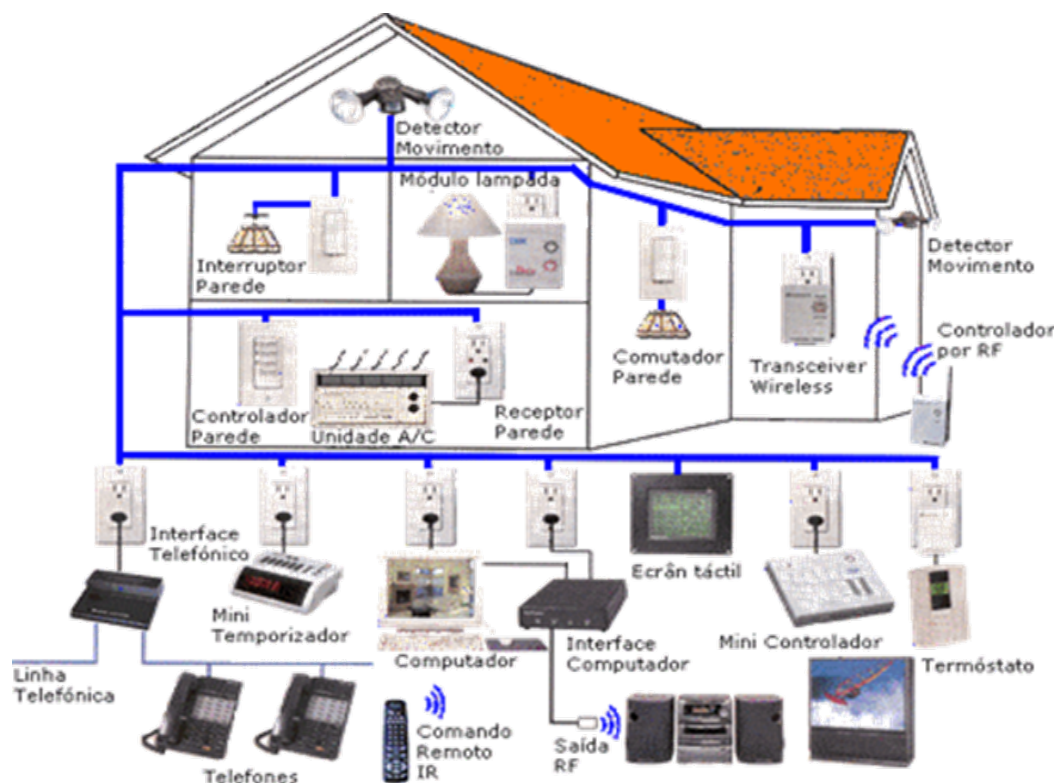


Figura 2. Sistemas que podem ser instalados na Domotica

Fonte: Neto; Junior; Carneiro (2017)

A automação também contribui para aumentar a segurança, emitindo alertas sonoros e mensagens em caso de violações ou tentativas de acesso não autorizado a portas, portões ou sistemas de controle de acesso. Tudo isso agrega valor significativo ao imóvel (Cardozo, 2017).

Cardozo (2017) também destaca que sistemas automatizados podem evitar um aumento significativo nas taxas de condomínio, que poderiam aumentar em até 30% a 40% devido ao aumento nas tarifas de eletricidade. Isso ocorre devido a uma nova política de tarifação de energia que impõe sobretaxas durante os horários de pico. Portanto, a automação residencial não resolve completamente esse problema, mas ajuda substancialmente a controlar os custos, evitando o uso de dispositivos elétricos durante os horários mais caros.

As economias resultantes da automação residencial abrangem diversas áreas, incluindo a otimização do consumo de energia elétrica, a gestão eficaz do uso de equipamentos e o monitoramento da saúde dos moradores, oferecendo assistência quando necessário (Cardozo, 2017). As assistentes de voz são interfaces que respondem a comandos de voz, e essa funcionalidade se tornou amplamente popular, principalmente devido ao lançamen-

to de produtos por grandes empresas como o Google, Microsoft e Apple (Pal *et al.*, 2019).

A domótica é projetada para servir às pessoas e não o contrário, e para alcançar esse objetivo, é essencial contar com profissionais qualificados e competentes. Esses profissionais têm a capacidade de integrar soluções certificadas e confiáveis, seguindo padrões internacionais, para atender às necessidades dos clientes de forma eficaz (Peronio; Bastos, 2017).

A automação aplicada ao sistema residencial, ou automação residencial, é o processo de integrar tecnologia avançada em casas para torná-las mais eficientes, seguras e convenientes. Através do uso de dispositivos interconectados, como sensores, atuadores e controladores, é possível automatizar tarefas cotidianas e monitorar o ambiente doméstico remotamente (Peronio; Bastos, 2017).

A presença desses especialistas é fundamental porque a eficiência e a inteligência da automação residencial dependem da integração de todos os sistemas e instalações. Um integrador é responsável por receber dados de todas as áreas da residência e controlar as operações de acordo com as necessidades programadas (Neto; Júnior; Carneiro, 2018).

As instalações residenciais podem ser divididas em dois tipos básicos: tradicionais e de nova tecnologia. Embora as instalações tradicionais sejam confiáveis e amplamente estabelecidas, elas têm várias limitações. Por outro lado, as instalações de nova tecnologia oferecem maior conforto, simplicidade na infraestrutura elétrica, maior segurança, flexibilidade e economia nas operações (Peronio; Bastos, 2017).

Conforme observado por Domingues e Pina (2015), as instalações tradicionais operam com sistemas rigidamente separados, seguindo esquemas antigos, que, embora sejam confiáveis, apresentam várias limitações. Na automação residencial, diversas instalações, cabos, dispositivos e sistemas podem ser incorporados para atender às necessidades e preferências dos clientes, com o custo geralmente dependendo do que o cliente está disposto a investir (Cardozo, 2017).

A central de monitoramento de alarme é um componente essencial na automação residencial, integrando-se ao sistema de segurança para oferecer mais proteção e controle. Segundo Muratori e Dal Bó (2014), esses dispositivos permitem que tarefas de vigilância sejam realizadas de maneira automatizada e eficiente. Com isso, a segurança da residência é otimizada, garantindo mais tranquilidade aos moradores. Na figura 3 tem-se à central de monitoramento.



Figura 3. Central de Monitoramento

Fonte: Neto; Junior; Carneiro (2017)

A tecnologia está em constante evolução, muitas vezes impulsionada por nossos sonhos e imaginação. Muitas inovações que antes pareciam apenas fruto da ficção já se tornaram realidade, como é o caso das casas inteligentes. Por outro lado, alguns sonhos, como carros voadores, ainda não se tornaram realidade devido à falta de tecnologia adequada para torná-los viáveis. Nesse contexto, é interessante discutir a evolução da domótica (Silva; Duarte; Luz, 2014).

Conforme destacado por Cunha (2018), as automações predial e residencial tiveram seu início com base na automação industrial, que é mais antiga e amplamente difundida. No entanto, devido às diferenças significativas entre esses dois tipos de ambientes, sistemas dedicados foram desenvolvidos para residências, onde não há espaço para grandes centrais de controle e sistemas com cabos extensos.

Além disso, a automação permite que a central seja integrada a outros dispositivos da casa, como câmeras e sensores. Isso facilita a criação de uma rede de segurança inteligente, capaz de identificar possíveis ameaças e acionar o alarme de maneira rápida e eficaz. O uso de tecnologia nesses sistemas reflete o avanço da automação residencial na melhoria da segurança. Na figura 4 tem-se o esquema de diagrama de Interligação dos dispositivos (Peronio; Bastos, 2017).

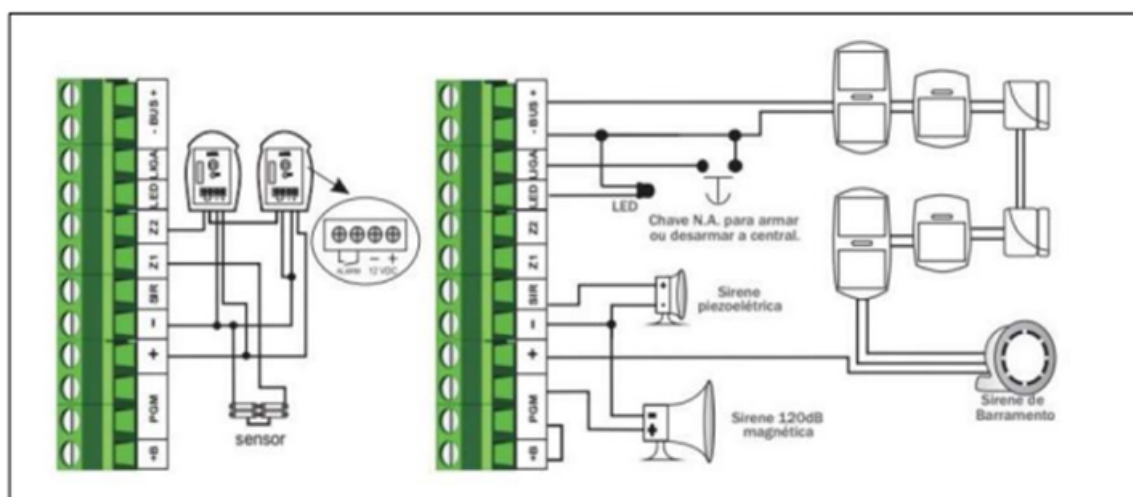


Figura 4. Diagrama de Interligação dos dispositivos

Fonte: Neto; Junior; Carneiro (2017)

A tecnologia das redes e protocolos para a Internet das Coisas (IoT) desempenha um papel crucial na automação residencial moderna, conforme destacado por Peronio (2019). As redes de Sensores Sem Fio (RSSF), também conhecidas como Wireless Sensor Networks (WSN), consistem em grandes quantidades de nós com baixo consumo de energia e aplicações multifuncionais. Essas redes são especialmente adequadas para uma variedade de sistemas destinados ao monitoramento e controle, oferecendo uma solução eficiente e flexível para diversas necessidades.

O painel frontal da central possui sinais de LED, que são fundamentais para indicar o status do sistema. Esses LEDs informam, por exemplo, se a central está armada, o nível de bateria e o estado de cada zona de alarme. Dessa forma, o usuário pode monitorar facilmente o funcionamento do sistema sem precisar acessar interfaces complexas (Cardozo, 2017).

As redes sem fio possuem características marcantes, como o volume reduzido de comunicação entre dispositivos e a capacidade de auto-recuperação em caso de falhas em qualquer nó da rede. Isso torna essas redes resilientes e confiáveis, essenciais para aplica-

ções em ambientes residenciais, onde a continuidade do serviço é fundamental. Além disso, a arquitetura dessas redes permite uma fácil implementação e adaptação a diferentes cenários e requisitos (Cardozo, 2017).

As economias resultantes da automação residencial abrangem diversas áreas, incluindo a otimização do consumo de energia elétrica, a gestão eficaz do uso de equipamentos e o monitoramento da saúde dos moradores, oferecendo assistência quando necessário (Cardozo, 2017). As assistentes de voz são interfaces que respondem a comandos de voz, e essa funcionalidade se tornou amplamente popular, principalmente devido ao lançamento de produtos por grandes empresas como o Google, Microsoft e Apple (Pal et al., 2019).

A presente descrição sintetiza dois tipos principais de redes e dispositivos: as de curto alcance, como Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee, e as de longa distância, como LoRaWAN, voltadas para sistemas específicos e de maior escala. As redes de curto alcance são ideais para comunicações em ambientes próximos, enquanto as de longa distância permitem a cobertura de grandes áreas, oferecendo maior flexibilidade para a implementação de soluções de IoT em contextos variados (Rodrigues, 2018).

Os nós de IoT são compostos por dispositivos microprocessados e autônomos, capazes de coletar dados por meio de sensores, processá-los e transmiti-los pela rede. A comunicação entre esses dispositivos é interligada a um gateway IoT, que centraliza as conexões dos nós e converte o protocolo específico de Radiofrequência (RF) para o formato da internet (Santos, 2019).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtudes dos fatos mencionados nesse trabalho chegamos as seguintes conclusões, embora automação residencial já tenha se tornado uma realidade, essa tecnologia ainda não possui grande disseminação e uso devido a alguns obstáculos ainda existentes. Um dos principais obstáculos seria o valor de implantação. sistemas de segurança.

É importante salientar que através do estudo do protocolo, podemos concluir que o padrão pode ser aplicado em automação residencial com grande eficiência e segurança. O hardware do padrão ZigBee possui tamanho reduzido para facilitar as montagens, baixo consumo de energia podendo ser alimentado por baterias com alta durabilidade.

Para melhor compreensão de controle desses equipamentos tivemos que abordar uso dos protocolos que tange essa tecnologia, juntamente com seus sistemas de acionamento e segurança, com isso tivemos entendimento do uso adequado dos sistemas de internet sem fio, redes interligadas de aparelhos e suas ramificações mostrando a conexão com cada aparelho na residência automatizada.

Far-se-á uma discussão presente para os futuros trabalhos em incrementar no discernimento teórico e bibliográfico para um desenvolvimento no que se diz respeito a domótica, usando da tecnologia para melhoria para segurança e conforto do bem estar da sociedade em geral. E por fim o estudo foi de grande valia pois possibilita novos caminhos dentro da automação residencial buscando formas mais alternativas de implantação dos sistemas que no par a utilização de cada tecnologia.



REFERÊNCIAS

- AYRES, M. **O que são Assistentes de Voz? Artigo, Marketing Conversacional**. 2019. Publicada em 29 de maio de 2019.
- BATISTA, Gustavo Henrique Bressan; RAMOS, Willian Prestes de; TAVARES, Guilherme Burdinski. **Sistema microcontrolado para automação residencial baseado em power line communication via protocolo X-10**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CARDOZO, Agnaldo. **Automação residencial com pic18f4550 e supervisor com comunicação por protocolo TCP/IP**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 4, n. 1, p. 89-89, 2017.
- CARVALHO, Taiana Souza; JUNIOR, Ary Ferreira. **A contribuição da “internet das coisas” para as organizações**. CESVA/FAA, p. 9. 2019.
- CUNHA, W. S. **Estudo da Inteligência Artificial aplicada em Internet das Coisas, voltada na Automação Residencial**. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVIII, n. 000121, 2018.
- DOMINGUES, Ricardo Gil; PINA, Alex Cirino de. **A Importância da Domótica para a Sustentabilidade das Cidades**. VII Encontro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção. Edificações, Infraestrutura e Cidade: do BIM ao CIM, p. 303-315, 2015.
- MURATORI, José Roberto; DAL BÓ, Paulo Henrique. **Automação Residencial – Conceitos e Aplicações**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora Educere Ltda., 2014.
- NETO, José Aprígio Carneiro; JÚNIOR, Lúcio da Silva Gama; CARNEIRO, Luiz Felipe Costa Silva. **Um mapeamento tecnológico da domótica no Brasil**. In: 9th International Symposium on Technological Innovation. 2018.
- PAL, D. et al. **User Experience with Smart Voice Assistants: The Accent Perspective**. IEEE, 2019
- PERONIO, Roni; BASTOS, Ana Paula Cocco. **Tecnologias livres a favor da acessibilidade**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 9, n. 4, 2017.
- RODRIGUES, Daniela Dalcin. **Internet das coisas: impacto da IoT nas estratégias publicitárias de meios**. 2018. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Lisboa, Escola Superior de Comunicação Social. Lisboa. 2018.
- SANTOS, Otávio Lube; DELFINO, Lorrainy Rembiski. **Um projeto de sala de aula inteligente para a faesa com o uso da internet das coisas e MQTT**. Revista Científica FAESA, v. 15, n. 2 Especial, p. 121-142, 2019.

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar a relevância da automação industrial e da robótica no contexto da Indústria 4.0, destacando o impacto dessas tecnologias na modernização dos processos produtivos. A metodologia adotada foi a revisão bibliográfica, explorando as principais inovações tecnológicas e seus efeitos no setor industrial. A Indústria 4.0 caracteriza-se pelo uso de tecnologias autônomas e eficientes, como internet das coisas, robótica, impressão 3D e big data, que promovem a customização de soluções para a produção, logística e clientes. A automação industrial ocupa um papel central nesse cenário, otimizando a produção, reduzindo erros humanos e aumentando a competitividade no mercado global. As principais conclusões indicam que a integração de tecnologias como inteligência artificial (IA) e robótica está transformando o setor industrial, permitindo a execução de tarefas complexas e tomadas de decisão autônomas. Além de otimizar a produção, essas inovações melhoram a segurança no trabalho, reduzem o impacto ambiental e aumentam a sustentabilidade das indústrias. A pesquisa ressalta ainda a importância da automação e da robótica na criação de fábricas inteligentes, capazes de atender às demandas de eficiência e flexibilidade produtiva, impulsionando o futuro das indústrias em um cenário de constante evolução tecnológica.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Automação industrial. Robótica. Inteligência artificial.

Abstract

This article aims to analyze the relevance of industrial automation and robotics in the context of Industry 4.0, highlighting the impact of these technologies on the modernization of production processes. The methodology adopted was a bibliographic review, exploring the main technological innovations and their effects on the industrial sector. Industry 4.0 is characterized by the use of autonomous and efficient technologies, such as the Internet of Things, robotics, 3D printing and big data, which promote the customization of solutions for production, logistics and customers. Industrial automation plays a central role in this scenario, optimizing production, reducing human errors and increasing competitiveness in the global market. The main conclusions indicate that the integration of technologies such as artificial intelligence (AI) and robotics is transforming the industrial sector, enabling the execution of complex tasks and autonomous decision-making. In addition to optimizing production, these innovations improve occupational safety, reduce environmental impact and increase the sustainability of industries. The research also highlights the importance of automation and robotics in creating smart factories, capable of meeting the demands of efficiency and production flexibility, driving the future of industries in a scenario of constant technological evolution.

Keywords: Industry 4.0. Industrial automation. Robotics. Artificial intelligence.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria desde o seu surgimento, e seguindo as evoluções tecnológicas passou por profundas transformações, especialmente em sua forma de produção. Até chegar ao modelo de Indústria 4.0, passou por três revoluções industriais, as quais forma aperfeiçoando seus meios de produção até chegar na tecnologia tão avançada vivida dentro das Quarta Revolução Industrial (Almada, 2016).

Segundo Koch et al. (2014) a Indústria 4.0 destaca-se pelo uso de produtos e processos mais autônomos e eficientes, além do fato de prover soluções customizadas para a produção, logística e clientes. Essa modalidade de indústria utiliza-se de tecnologias de automação industrial com sensores.

Cardoso (2016) cita que algumas tecnologias utilizadas na indústria 4.0 como: internet das coisas, robótica, impressora 3 D, big data e outros. Segundo o autor, tais tecnologias tem ocasionado o aumento da produção de forma bastante considerável e com qualidade. A automação industrial, elemento central desta transformação, é essencial para otimizar a produção, reduzir erros humanos e aumentar a competitividade no mercado global.

Este artigo busca explorar a relevância da automação e da robótica no contexto da Indústria 4.0, analisando como essas tecnologias estão remodelando o cenário industrial. Por meio de uma revisão bibliográfica, pretende-se compreender as principais tendências, desafios e benefícios associados à implementação dessas inovações, bem como identificar as implicações para o futuro das indústrias.

A robótica, que há muito tempo foi idealizada pela humanidade, começou a demonstrar seu verdadeiro potencial com o advento da Inteligência Artificial (IA), permitindo que máquinas executem tarefas complexas e tomadas de decisão autônomas. Nesse contexto, é fundamental compreender como a integração da IA com a robótica está transformando os processos industriais, otimizando a produção e criando novas oportunidades para o desenvolvimento de fábricas inteligentes.

Diante desse cenário, surge o seguinte problema de pesquisa: como a robótica, impulsionada pela Inteligência Artificial, pode ser inserida de forma eficiente e sustentável na Indústria 4.0, contribuindo para a automação avançada e a melhoria contínua dos processos produtivos?

O objetivo geral deste artigo é analisar a relevância da automação industrial e da robótica no contexto da Indústria 4.0, destacando seu impacto na modernização dos processos produtivos. Entre os objetivos específicos, busca-se identificar as principais tecnologias associadas a esses campos, com foco na robótica, e descrever os impactos dessas inovações na eficiência produtiva, segurança no trabalho e sustentabilidade das indústrias.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, do tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.



Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para a busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área gestão da Automação industrial, como Albertin (2017), Cardoso (2016), Almada (2016), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise. As palavras-chave utilizadas foram: Robótica, Inteligência Artificial, Automação Industriais e Indústria 4.0.

2.2 Resultados e Discussão

Com o avanço constante das tecnologias inovadoras, emerge o conceito de Indústria 4.0, que visa atender à crescente demanda por excelência produtiva. Essa nova abordagem fundamenta-se na automação dos processos produtivos e na integração digital de toda a cadeia de valor, promovendo uma conexão estreita entre o mundo físico e o virtual (Albertin *et al.*, 2017).

De acordo com o Boston Consulting Group, essa transformação é sustentada por nove pilares tecnológicos essenciais: Internet das Coisas, realidade aumentada, robôs autônomos, simulação, manufatura aditiva, big data, computação em nuvem, cibersegurança e a integração horizontal e vertical de sistemas e softwares (Koch *et al.*, 2014).

Segundo Albertin *et al.* (2017) a evolução tecnológica tem como objetivo não apenas otimizar a eficiência produtiva, mas também criar um ambiente onde as máquinas e os sistemas digitais se comunicam de forma inteligente e autônoma. A fusão entre os universos físico e digital, mediada por esses nove pilares, propicia uma maior flexibilidade e personalização na produção, bem como uma resposta mais rápida às mudanças do mercado, alinhando-se às demandas de uma economia cada vez mais dinâmica e conectada.

A Indústria 4.0 se caracteriza pelo uso de processos e produtos mais autônomos e eficientes, além de oferecer soluções personalizadas para a produção, logística e clientes. Essa nova fase da indústria faz uso intensivo de tecnologias de automação, integrando sensores e sistemas avançados. Koch *et al.* (2014) apontam que o principal objetivo dessa revolução industrial é desenvolver um sistema de produção mais inteligente e eficiente, capaz de resolver problemas de forma autônoma, sem a necessidade de intervenção humana.

Cardoso (2016) destaca algumas das principais tecnologias empregadas na Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT), robótica, impressão 3D e big data, que têm contribuído significativamente para o aumento da produção com maior qualidade. Neste contexto, a robótica, devido à sua relevância e eficácia, é o foco deste estudo, especialmente no que se refere à sua aplicação na Quarta Revolução Industrial. Vale ressaltar que, embora os robôs tenham sido um sonho humano desde a antiguidade, sua real importância só se evidenciou com o avanço da Inteligência Artificial (IA) (Coelho, 2016).

2.2.1 Automação Industrial e Industria 4.0

A primeira Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra entre 1760 e 1840, marcou a transição do trabalho artesanal para a produção mecanizada, com impacto significativo nas condições de trabalho e na estrutura social da época. Os trabalhadores, antes autônomos, passaram a operar sob o ritmo das máquinas, enfrentando condições laborais adversas e salários baixos, o que trouxe profundas mudanças sociais (Fenerick; Volante, 2020).

A segunda Revolução Industrial, ocorrida no final do século XIX, foi impulsionada pela descoberta da eletricidade, que possibilitou avanços tecnológicos em diversas áreas, como transporte e comunicação. A introdução de linhas de produção e a industrialização em massa reduziram os custos de produção, transformando a economia e ampliando o acesso a produtos antes caros (Coelho, 2016;).

A terceira Revolução Industrial, entre 1950 e 1970, trouxe a revolução digital, caracterizada pela incorporação de tecnologia da informação nas indústrias, o que aumentou a automação e a produtividade. No século XXI, a evolução da internet e a miniaturização de dispositivos eletrônicos deram origem à quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, baseada em tecnologias como computação em nuvem e robótica, que continuam a transformar a automação industrial (Meran, 2016). Na **Figura 1** é possível observar a linha do tempo da Revolução industrial.

Figura 1. Revolução das indústrias



Fonte: Coelho (2016).

De acordo com Moreno (2020), a Automação e a Indústria 4.0 representam uma revolução nos processos produtivos, caracterizada pela integração de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e big data. Essas tecnologias permitem a criação de fábricas inteligentes, onde máquinas e sistemas se comunicam entre si, otimizando a produção e reduzindo custos. Além disso, a personalização em massa tornou-se possível, atendendo a demandas específicas com maior eficiência.

Conforme Romano e Dutra (2015), na Indústria 4.0, a automação não se limita mais à execução de tarefas repetitivas; ela envolve a tomada de decisões autônomas por sistemas inteligentes. Sensores e dispositivos conectados monitoram em tempo real as condições de produção, permitindo ajustes automáticos e prevenindo falhas. Isso resulta em maior flexibilidade e agilidade, fundamentais para competir em um mercado globalizado.

A Indústria 4.0 impulsiona a necessidade de novos modelos de negócios e qualificações profissionais. A automação avança rapidamente, exigindo que trabalhadores se adaptem a novas funções, focadas em análise de dados e gestão de sistemas complexos. Empresas que investem em inovação e capacitação ganham vantagem competitiva, moldando o futuro da produção industrial (Avila, 2016).

Segundo Mendes, Siemon e Campos (2017), as instalações das indústrias automotivas ainda não alcançaram a excelência na conectividade entre humanos e máquinas. No entanto, o uso dos princípios da Indústria 4.0 já começou, impulsionado pela demanda crescente por tecnologias avançadas nos automóveis.

Conforme Almada (2016), o diferencial da Indústria 4.0 está na evolução dos processos de fabricação, que passam de ilhas robóticas automatizadas para sistemas totalmente interligados. Isso aumenta a flexibilidade, a velocidade, a produtividade e a qualidade nos sistemas produtivos.

Segundo Hofmann et al. (2017), a Feira de Hannover de 2017 destacou a Indústria 4.0 e sua aplicação nas tecnologias de fabricação. Os autores afirmam que a implementação dessas tecnologias está acontecendo gradualmente, transformando de forma significativa o processo de produção.

De acordo com Reis (2021), as instalações industriais estão se tornando mais autônomas, adaptando-se melhor às exigências do mercado. A automação, destacada especialmente nas grandes indústrias, permite a interligação das unidades de produção, a criação de redes digitais e o uso mais eficiente dos recursos.

Segundo Almada (2016), a automação é o principal destaque da nova indústria, especialmente nas grandes indústrias. Essa automação permite a interligação das unidades de produção, a criação de redes de produção digital e um uso mais eficiente dos recursos. Além disso, a conectividade digital e o acesso rápido aos clientes e usuários finais são pontos chave para essa evolução.

Conforme Romano e Dutra (2015), a definição de robô industrial como um manipulador multifuncional reprogramável projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas, já sugere as múltiplas aplicações possíveis para esse equipamento.

Segundo Ávila (2016), embora os robôs tenham surgido no século XX, a ideia de autômatos é um antigo desejo humano. Há registros de brinquedos mecânicos no Egito por volta de 2000 a.C., e as histórias de Ilíadas mencionam personagens com voz e inteligência, criados pelo deus dos ferreiros.

De acordo com Reis (2021), a robótica industrial começou na década de 1950, e desde então, os robôs têm desempenhado um papel cada vez mais importante nas indústrias. Esse avanço levou à automação industrial, permitindo que os robôs realizem tarefas complexas de maneira mais econômica e precisa. Na Indústria 4.0, o uso de robôs se tornou uma característica marcante.

Maran (2016) aponta que a robótica na Indústria 4.0 é crucial para impulsionar inovações e aumentar a produtividade, contribuindo significativamente para o desenvolvimento do setor industrial. Os robôs desempenham papéis variados nas empresas, incluindo a produção padronizada. Na **Figura 2** é possível observar procedimento robótico.

Reis (2021) também destaca que outra importância da robótica na indústria e em outros setores está relacionada à redução da exposição humana a ambientes insalubres. A automação robótica permite a realização de operações que variam desde o transporte até o uso de robôs equipados com visão integrada e capacidade de adaptação em tempo real.

Figura 2. Robótica na indústria

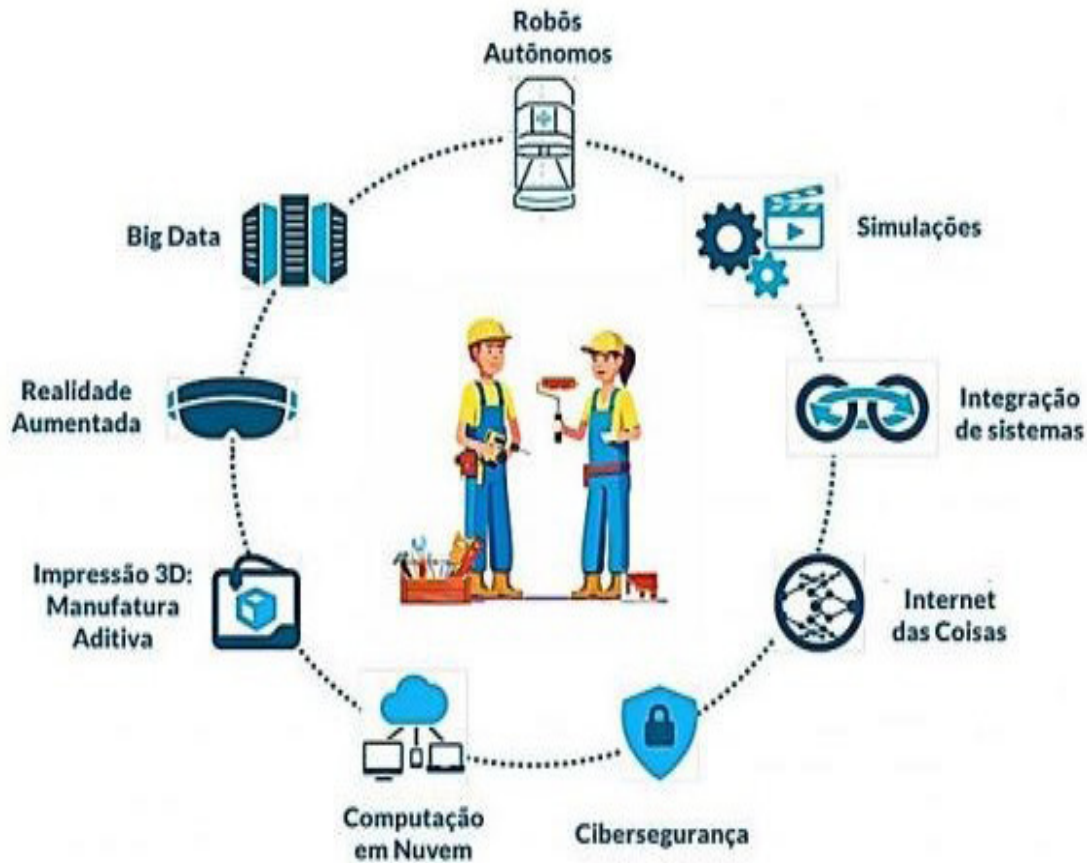


Fonte: Reis (2021).

Com o avanço da era da informação e da informática, o desempenho das máquinas na indústria foi aprimorado, tornando-as mais rápidas e economicamente viáveis. A utilização de softwares inteligentes permite a supervisão e monitoramento remoto da manufatura em tempo real, eliminando a necessidade de interação direta dos operadores nas atividades diárias (Costa; Stefano, 2014).

Os processos industriais em malha fechada, anteriormente inacessíveis financeiramente, tornaram-se mais acessíveis, com uma redução de custos de até 85%. Em 2013, foram fabricadas aproximadamente 179.000 unidades robóticas, um número que cresce anualmente devido à crescente acessibilidade, com os preços dos robôs caindo em média 10% ao ano (Costa; Stefano, 2014).

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à interconexão lógica de dispositivos e sistemas no ambiente produtivo, incluindo sensores, computadores e células de produção, todos conectados e analisados em um banco de dados. Essa integração permite uma análise abrangente, envolvendo não apenas dados internos, mas também informações externas como clima e fornecedores (Venturelli, 2014). Na **Figura 3** é possível observar a interligação dos sistemas da indústria 4.0

Figura 3. Representação de dois conceitos englobados pela Indústria 4.0

Fonte: CIRUELO – Indústria 4.0 (2020)

O conceito de M2M (Máquina para Máquina) facilita a comunicação autônoma entre células de produção, permitindo que os sistemas tomem decisões sobre produção, custos e segurança com o suporte de inteligência artificial. Isso é complementado pela IoT, e novas tecnologias de automação industrial, originadas do campo da Tecnologia da Informação, são essenciais para essa transformação (Fenerick; Volante, 2014).

As Tecnologias como o protocolo IPv6, redes sem fio, virtualização, *cloud computing*, Big Data e RFID estão moldando a indústria moderna. Essas inovações garantem que todos os dispositivos estejam conectados, permitindo decisões baseadas em dados em tempo real e promovendo a integração de sistemas produtivos (Alves, 2015).

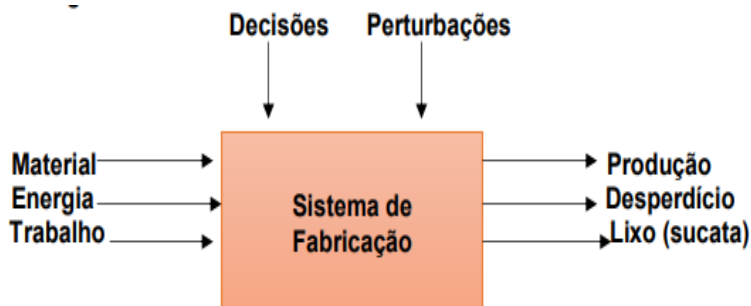
Com a Indústria 4.0, observa-se uma transição significativa para uma realidade produtiva onde tudo está interconectado e as decisões são dinâmicas. A eficiência energética, a integração da cadeia produtiva e o uso de *Business Intelligence* são aspectos fundamentais para a adaptação a essa nova era, garantindo uma operação mais ágil e eficiente (Venturelli, 2017).

2.2.2 Modelo Estrutural de um Sistema Automatizado

A transformação da matéria-prima em um produto final de qualidade envolve diversas operações realizadas pelos operários ou colaboradores, incluindo a concepção do produto, operação de equipamentos, e inspeção. Recentemente, há uma tendência crescente de automatizar muitas dessas funções, elevando o papel dos operadores humanos para o de monitor e supervisor (Fialho, 2014).

Essa evolução tecnológica busca otimizar o processo produtivo ao reduzir a necessidade de intervenção manual direta e aumentar a eficiência dos sistemas. Com a automação, o foco dos operadores se desloca para a supervisão e o monitoramento dos processos, permitindo uma melhor gestão e controle das operações (Albertin *et al.*, 2014). Na **Figura 4** é possível observar o diagrama processo manufaturado.

Figura 4. Sistema de manufatura: modelo de entradas e saídas



Fonte: Fialho (2014).

A tecnologia de manufatura abrange a sofisticação e flexibilidade dos equipamentos, visando integrar o fluxo de materiais e informações no sistema. Os sistemas podem variar de manuais a totalmente automatizados e de altamente dedicados a completamente flexíveis. A escolha da tecnologia define o tipo de produção em massa, por lote ou flexível influencia as economias obtidas, que podem ser de escala ou de escopo (Alves, 2015).

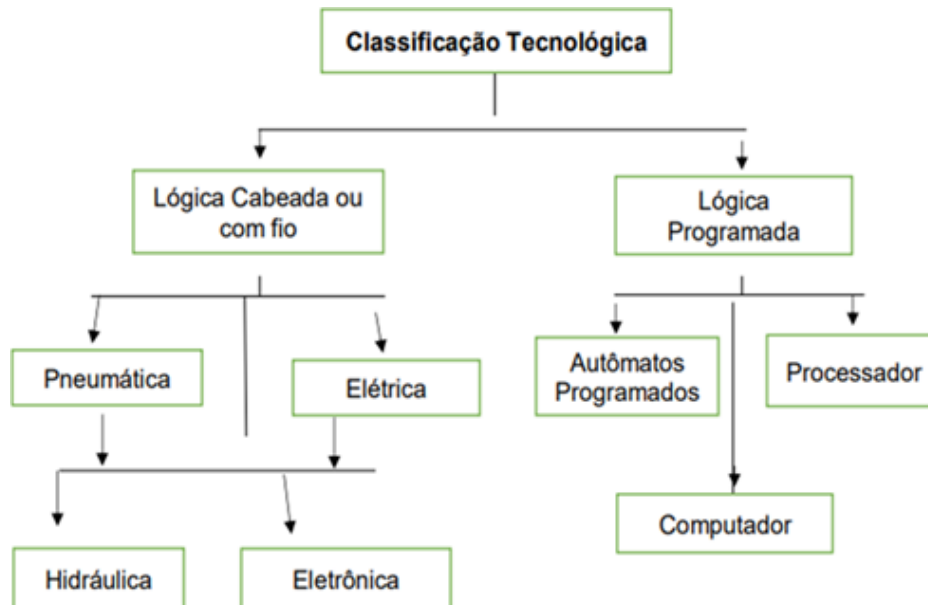
Um modelo estrutural de um sistema automatizado descreve a organização e a integração dos diversos componentes que compõem o sistema. Este modelo inclui sensores, atuadores, controladores e sistemas de comunicação, cada um desempenhando um papel específico na automação. Os sensores capturam dados do ambiente ou do processo, enquanto os atuadores realizam ações baseadas nas instruções recebidas (Koch *et al.*, 2014).

Segundo Koch *et al.* (2014), os controladores, frequentemente representados por unidades de controle programáveis (PLC), processam as informações recebidas dos sensores e emitem comandos para os atuadores. A comunicação entre esses componentes é essencial para garantir uma operação coordenada e eficiente. Sistemas de comunicação, como redes industriais, facilitam a troca de informações entre os diferentes elementos do sistema automatizado.

A arquitetura do sistema automatizado deve ser projetada para ser escalável e flexível, adaptando-se às mudanças nas demandas de produção e às inovações tecnológicas. A capacidade de atualizar ou expandir o sistema sem comprometer a operação existente é fundamental para manter a competitividade e a eficiência ao longo do tempo (Silva, 2020).

O avanço dos controladores, sua complexidade e eficiência estão diretamente ligados ao progresso tecnológico ao longo do tempo. A classificação tecnológica dos controladores pode ser baseada em dois conceitos principais: lógica cabeada e lógica programada. Esses conceitos representam diferentes abordagens na implementação de sistemas de controle, refletindo as melhorias e inovações tecnológicas ao longo dos anos (Alves, 2015).

De acordo Reis (2021), além disso, o modelo estrutural deve considerar a interface do usuário, que permite a interação humana com o sistema. Essa interface é crucial para a monitoração e o ajuste dos parâmetros do sistema, garantindo que as operações estejam alinhadas com os objetivos produtivos. A integração de sistemas de visualização e controle melhora a eficiência e a usabilidade do sistema automatizado.

Figura 5. Classificação Tecnológica

Fonte: Silva (2020).

A Parte de Controle, também conhecida como Parte de Comando, é responsável por coordenar as operações para assegurar que a Parte Operativa siga as especificações de projeto estabelecidas. Suas funções principais incluem o gerenciamento das entradas e saídas do sistema, o tratamento de equações lógicas, e a implementação de funções de segurança. Além disso, a Parte de Controle gerencia o tratamento sequencial, as funções de regulação e realiza cálculos para otimização (Negri, 2014).

2.2.3 Os Principais Elementos Tecnológicos Utilizados Nas Empresas Para Otimizar A Produção – Robótica

A Manufatura Avançada envolve a aplicação de tecnologias inovadoras para aumentar a competitividade, abrangendo toda a cadeia de valor, desde o desenvolvimento até o fim da vida útil dos produtos. Utilizando tecnologias de comunicação da informação (TIC), busca integrar atividades de manufatura e comerciais para uma operação mais eficiente (Moreno, 2020).

A Realidade Virtual é geralmente usada para dois propósitos principais: entretenimento, como jogos e simulações, e treinamento, oferecendo ambientes controlados para prática e aprendizado. Esse tipo de tecnologia permite que os usuários experimentem situações e cenários que seriam impossíveis ou impraticáveis no mundo real (Maran, 2016). Na **Figura 6** é possível observar a tecnologia realidade aumentada.

Figura 6.. Óculos de realidade aumentada do *Osterhout Design Group*.



Fonte: Ciruelo (2020)

A Realidade Virtual (VR) tem dois principais usos: aprimorar experiências de entretenimento, como videogames e filmes 3D, e melhorar o treinamento ao criar simulações realistas para prática. Essa tecnologia é particularmente útil para empresas, permitindo que trabalhadores manipulem máquinas e dispositivos virtualmente, sem a necessidade de equipamentos físicos, facilitando o aprendizado e a prática de habilidades (Almada, 2016).

A Manufatura Avançada utiliza métodos de produção versáteis que maximizam o uso dos recursos disponíveis, oferecendo maior eficiência e adaptabilidade a mudanças. Embora métodos tradicionais ainda sejam adequados para produções longas e previsíveis, a Manufatura Avançada pode atender a diversas necessidades de produção e personalização em massa sem exigir investimentos excessivos de capital (Almada, 2016).

Para criar essas experiências virtuais, utiliza-se uma linguagem de codificação chamada VRML (*Virtual Reality Modeling Language*). Essa linguagem permite a criação de imagens e a definição das interações possíveis dentro da simulação, tornando a VR uma ferramenta poderosa para desenvolver ambientes imersivos e interativos (Coelho, 2016).

A VR pode ser classificada em três categorias com base no nível de imersão: não imersivo, onde a VR é acessada por aplicativos de desktop em dispositivos genéricos; semi-imersivo, que utiliza dispositivos de alta resolução como projetores e televisores; e completamente imersivo, que envolve tecnologias que proporcionam uma experiência totalmente envolvente (Silva, 2020).

É importante distinguir entre Realidade Aumentada e Realidade Virtual, pois frequentemente são confundidas. A Realidade Virtual (VR) cria uma simulação computadorizada de um ambiente ou situação real, imergindo o usuário na experiência através da estimulação visual e auditiva. Isso é feito por meio de fones de ouvido e telas, proporcionando uma sensação de estar presente na realidade simulada (Romano; Dutra, 2015).

A Realidade Aumentada (AR) pode ser dividida em duas categorias principais com base no uso de marcadores. A AR baseada em marcadores utiliza símbolos impressos, como imagens ou códigos, para sobrepor informações digitais, como imagens, objetos 3D ou vídeos, quando são reconhecidos por um software específico. Para funcionar corretamente, o marcador deve estar em uma superfície plana e o dispositivo precisa manter uma distância adequada (Silva, 2020).

3. CONCLUSÃO

A análise conduzida ao longo deste estudo permitiu alcançar os objetivos propostos, evidenciando a relevância da automação industrial e da robótica no contexto da Indústria 4.0. As tecnologias estudadas, como a internet das coisas, inteligência artificial e robótica avançada, mostraram-se essenciais para a modernização dos processos produtivos, com impactos significativos na eficiência, segurança e sustentabilidade industrial. Dessa forma, pode-se afirmar que o estudo atendeu à expectativa de identificar e analisar as principais inovações tecnológicas associadas à Indústria 4.0, cumprindo o objetivo geral estabelecido.

No entanto, algumas limitações surgiram ao longo da pesquisa. O acesso a dados empíricos atualizados e estudos de caso específicos de empresas que já implementaram essas tecnologias foi limitado, o que restringiu a capacidade de ilustrar de maneira mais concreta os impactos práticos das inovações discutidas. Além disso, o escopo da revisão bibliográfica, embora abrangente, poderia ter sido ampliado com uma análise comparativa entre diferentes setores industriais, o que traria uma perspectiva mais detalhada sobre as

variações na adoção das tecnologias.

Recomenda-se que estudos futuros aprofundem a análise das tecnologias de automação e robótica em setores específicos da indústria, além de explorar a integração dessas inovações com práticas sustentáveis e de economia circular. Além disso, pesquisas empíricas que envolvam entrevistas e estudos de caso em empresas que já aplicam os princípios da Indústria 4.0 poderiam fornecer dados mais concretos para corroborar os benefícios relatados.

Por fim, é importante destacar que o tema ainda está em evolução, e as inovações tecnológicas continuam a se desenvolver rapidamente. A robótica e a automação, impulsionadas pela inteligência artificial, continuarão a remodelar o cenário industrial, sendo necessário que os futuros trabalhos acompanhem essa transformação para oferecer novas reflexões e estratégias para a indústria contemporânea.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. **Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura**. 2017.
- ALMADA-LOBO, F. A revolução da Indústria 4.0 e o futuro dos Sistemas de Execução de Manufatura (MES). **Revista de Gestão da Inovação**, v. 3, n. 4, p. 17 de fev. 2016.
- AVILA, RNP. *Inteligência Artificial: Redes Neurais e Robótica (Básico, Intermediário e Avançado)*. **Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA**, 2016.
- ALVES, José Luiz Loureiro. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. Grupo Gen-LTC, 2015.
- CIRUELO, J.T. **Minsait Industrial**. 2020. www.tecnologiasaccesibles.com/pt-br. Acesso em: 25 jun. 2024.
- COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à indústria 4.0**. 2016. Dissertação de Mestrado.
- COSTA, Melina; STEFANO, Fabiane. **A era das fábricas inteligentes estão começando**. Revista eletrônica Exame. 2014. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/revista-exame/a-fabrica-do-futuro/>>. Acessado em 28 jun. 2024.
- FENERICK, Jessica Aparecida; VOLANTE, Carlos Rodrigo. A evolução das indústrias, os benefícios da automação e as perspectivas do mercado da robótica no Brasil e no mundo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 734-745, 2020.
- FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial: conceitos, aplicações e análises**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- HOFMANN, Erik; RÜSCH, Marco. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in industry**, v. 89, p. 23-34, 2017.
- KOCH, V. et al. *Industry 4.0-Opportunities and challenges of the industrial internet*. *Strategy& Formerly Booz & Company*, PwC, 13, 1-51. 2014.
- MARAN, P. D. A **Inteligência Artificial** é mais **antiga do que você imagina**. 2016. Disponível em: <https://tecnoblog.net/195106/inteligencia-artificial-historia-dilemas/>. Acesso em: 10. julho. 2024.
- MENDES, Cleiton Rodrigues; SIEMON, Franz Biondi; CAMPOS, Milena Monteagudo de. Estudos de caso da indústria 4.0 aplicados em uma empresa automobilística. **POSGERE. São Paulo**, v. 1, p. 15-25, 2017.
- MORENO, E.G. **Automatização de Processos Industriais. E-book**. Universidade Politécnica de Vassouras – Minas Gerais. Curso de Ciência da Computação. 2020. DE NEGRI, V. J. Introdução aos Sistemas para Automação e Controle Industrial.
- Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. (Apostila do curso de pós-graduação).
- REIS, S. V. dos. **Por que os robôs colaborativos estão revolucionando a indústria?** 2021. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/tag/rob%C3%B3tica>. Acesso em: 10 ago. 2024
- ROMANO, Vitor Ferreira; DUTRA, M. Introdução a robótica industrial. **Robótica Industrial: Aplicação na In-**

dústria de Manufatura e de Processo, São Paulo: Edgard Blücher, p. 1-19, 2015.

SILVA, Sérgio Francisco. **Automação Industrial Via Internet**: Uma Abordagem de Software Voltada à Pequena Empresa, Centro Universitário do Triângulo - Unit, Uberlândia – MG. 2020.

VENTURELLI, Márcio. Indústria 4.0: uma visão da automação industrial. **Automação Industrial**, v. 2, 2017.



Resumo

A convergência entre os mundos físico e digital, impulsionada pela Internet das Coisas (IoT), revolucionou a automação residencial, permitindo uma interconexão sem precedentes entre dispositivos eletrônicos além dos tradicionais smartphones. Equipamentos inteligentes tornaram-se capazes de prevenir acidentes, como vazamentos de gás ou incêndios, por meio de centrais automatizadas de controle e tomada de decisões. A IoT possibilitou a coleta, transmissão e recepção autônoma de dados, oferecendo aplicações diversificadas, desde a gestão inteligente de energia até a monitorização remota de sistemas domésticos, superando as limitações das soluções de automação convencionais. Este artigo investigou como o avanço da automação e o advento da IoT aprimoraram projetos de automação residencial, destacando os benefícios, desafios e implicações dessa tecnologia. Foram apresentados modelos de dispositivos inteligentes comuns na domótica, além de uma análise dos principais protocolos utilizados, considerando suas características, vantagens e desvantagens em termos de interoperabilidade e segurança. A pesquisa visou, portanto, compreender como a integração proporcionada pela IoT criou ambientes domésticos mais inteligentes e eficientes, atendendo às crescentes demandas por soluções que melhoraram a qualidade de vida e a conveniência nas residências modernas.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Automação residencial. Dispositivos inteligentes. Domótica.

Abstract

The convergence between the physical and digital worlds, driven by the Internet of Things (IoT), has revolutionized home automation, enabling unprecedented interconnection between electronic devices beyond traditional smartphones. Smart devices have become capable of preventing accidents, such as gas leaks or fires, through automated control and decision-making centers. IoT has enabled the autonomous collection, transmission, and reception of data, offering diverse applications, from smart energy management to remote monitoring of home systems, overcoming the limitations of conventional automation solutions. This article investigated how the advancement of automation and the advent of IoT have improved home automation projects, highlighting the benefits, challenges, and implications of this technology. Models of common smart devices in home automation were presented, in addition to an analysis of the main protocols used, considering their characteristics, advantages, and disadvantages in terms of interoperability and security. The research therefore aimed to understand how the integration provided by IoT created smarter and more efficient domestic environments, meeting the growing demands for solutions that improved quality of life and convenience in modern homes.

Keywords: Internet of Things. Home automation. Smart devices. Home automation.



1. INTRODUÇÃO

A convergência entre os mundos físico e digital está se tornando cada vez mais evidente, conectando pessoas através de uma ampla gama de dispositivos eletrônicos que vão muito além dos simples smartphones com acesso à internet. Com o advento de equipamentos inteligentes, estamos testemunhando a capacidade de prevenir acidentes, como vazamentos de gás ou incêndios, por meio de centrais responsáveis pelo controle e pela tomada de decisões automatizadas.

Este avanço tecnológico está intrinsecamente ligado à automação residencial, que se caracteriza pela interligação de sistemas para facilitar o controle e o manuseio de equipamentos, promovendo a integração desses produtos e eliminando as fronteiras entre os domínios físico e virtual. No entanto, dentro do vasto campo da automação residencial, vislumbramos possibilidades ainda mais significativas por meio da IoT, um paradigma que promete revolucionar a maneira como interagimos com nossos ambientes domésticos.

A IoT oferece uma rede de dispositivos interconectados que podem coletar, transmitir e receber dados de forma autônoma, permitindo uma gama diversificada de aplicações na automação residencial. Desde a gestão inteligente de energia até a monitorização remota de dispositivos e sistemas domésticos, a IoT oferece um potencial transformador que transcende as capacidades das soluções de automação convencionais.

A pesquisa sobre a aplicação da IoT na automação residencial é relevante por diversos motivos. Em primeiro lugar, ela atende às crescentes demandas por soluções que melhorem a qualidade de vida e a conveniência das pessoas em seus lares. Além disso, a acessibilidade crescente da IoT na automação residencial destaca a importância de compreender seus impactos, oportunidades e desafios.

A IoT aplicada na automação residencial revoluciona a forma como interagimos com nossas casas. Ao conectar dispositivos domésticos à internet, como luzes, termostatos e eletrodomésticos, é possível controlá-los remotamente por meio de smartphones ou assistentes virtuais. Dentro do âmbito mencionado, este estudo explorou a seguinte indagação: De que forma o avanço dos sistemas de automação e controle, combinado com o advento da Internet das Coisas, pode contribuir nos projetos de automação residencial?

O objetivo geral deste artigo é compreender como a integração e evolução proporcionadas pela IoT podem ser empregadas em projetos de automação residencial, destacando os benefícios, desafios e implicações dessa tecnologia na criação de ambientes domésticos mais inteligentes e eficientes.

Para isso, foram apresentados alguns modelos de dispositivos inteligentes mais usuais na domótica, explorando suas funcionalidades e aplicabilidades no contexto de automação residencial. Além disso, foram descritos os principais protocolos usados na domótica, analisando suas características, vantagens e desvantagens, bem como a sua relevância para a interoperabilidade e segurança dos sistemas de automação residencial.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Resultados e Discussão

A Internet das Coisas (IoT), conforme definida pela União Internacional de Telecomunicações, representa uma rede de dispositivos físicos, veículos, eletrodomésticos e outros

objetos equipados com eletrônicos, software, sensores, atuadores e conectividade de rede. Essa rede possibilita a conexão e troca de dados entre os objetos, constituindo uma inovação tecnológica que não é impulsionada apenas por interações humanas, mas sim pela interconexão de objetos entre si (Accardi; Dodonov, 2020).

Kevin Ashton, pesquisador britânico do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), cunhou o termo “Internet das Coisas” em 1999, visualizando uma nova era de revolução nas redes e comunicações. Em uma entrevista à revista *Inovação* em dezembro de 2014, Ashton destacou que a IoT representa um momento em que duas redes distintas - a rede de comunicação humana, exemplificada pela internet, e o mundo real dos objetos - estão convergindo (Aureside, 2020).

A IoT visa a integração da internet com objetos físicos, permitindo a coleta de dados e tomada de decisões em tempo real. Isso promove uma maior interação entre o mundo físico e virtual, resultando em eficiência energética aprimorada, precisão, economia e menor intervenção humana nos processos (Teza, 2020).

A aplicação da IoT é vasta, abrangendo diversos campos, como a automação residencial, onde dispositivos como lâmpadas, geladeiras, torradeiras e outros componentes eletrônicos utilizam essa tecnologia para comunicação e controle (Aureside, 2020).

A visão de um futuro com trilhões de sensores integrados ao ambiente, conectados por sistemas de computação, software e serviços, sugere a capacidade de monitorar e interagir com o planeta de forma inédita, comparável à revolução que a internet trouxe à comunicação (Bolzani, 2014).

No entanto, a IoT também apresenta desafios, como questões de privacidade e segurança. Dispositivos inteligentes podem coletar uma grande quantidade de dados sobre os usuários, e se essas informações caírem em mãos erradas, podem ser usadas de maneira fraudulenta ou maliciosa, representando riscos à segurança (Bolzani, 2015). Para os desenvolvedores, a IoT oferece oportunidades significativas, facilitando o projeto e implementação de aplicativos por meio de blocos de construção disponíveis. Isso tende a estimular a inovação, especialmente entre desenvolvedores menores (Bolzani, 2014).

2.1.1 Contexto Histórico da Domotica

O conceito de automação refere-se à capacidade de tornar a operação de um processo ou tarefa automática, com pouca ou nenhuma intervenção humana. Sua ascensão teve um impulso significativo durante a Revolução Industrial na Inglaterra, (Bolzani, 2014). Um marco importante no desenvolvimento da automação residencial foi a introdução das primeiras máquinas elétricas de lavar roupas em 1908. Contudo, foi na década de 1970 que ocorreu um avanço notável com a chegada dos PLCs (*Power Line Communication*), conhecidos no Brasil como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) (Macedo, 2020).

A expansão da automação segue uma escala progressiva, inicialmente beneficiando as indústrias, seguido pelas áreas comerciais e prediais, e, por fim, a área residencial. Embora o custo da tecnologia empregada na indústria seja mais elevado devido à necessidade de confiabilidade, os equipamentos destinados à automação residencial são mais acessíveis, dada a sua simplicidade de uso (TEZA, 2020).

Durante o processo de automação residencial, diversas abordagens são adotadas, desde as formas de realização até a finalização, passagem de cabos, dispositivos e sistemas utilizados. Essa diversidade é crucial para atender às demandas dos clientes e oferecer flexibilidade de custo, visto que há diferentes maneiras de concluir o produto (TEZA, 2020).

Esse tipo de sistema era denominado Power Line Carrier (PLC) e sua tecnologia não permitia de forma integrada o comando de diversos sistemas. Segundo Teza (2020), com a concepção da internet, computadores e outros dispositivos móveis, surgiu a necessidade de criar novos sistemas para uma utilização integrada. Nos países mais desenvolvidos, a domótica se desenvolveu de forma bastante positiva, aumentando a demanda, formando técnicos especializados e minimizando os custos de instalação. Pesquisas recentes indicam que os consumidores que buscam automatizar suas casas estão considerando o uso de aparatos sustentáveis, com o objetivo de reduzir os custos de projeto e instalação. O quadro 1 demonstra a evolução tecnológica em sistemas aplicados às novas moradias.

Tecnologia	2003	2005	2006	2015
Cabeamento Estruturado	42%	49%	53%	80%
Monitoramento de Segurança	18%	29%	32%	81%
Multiroom e Áudio	9%	15%	16%	86%
Home Theater	9%	11%	12%	86%
Controle de Iluminação	1%	6%	8%	75%
Automação Integrada	0%	6%	6%	75%
Gerenciamento de Energia	1%	11%	11%	62%

Quadro 1. A evolução de sistemas aplicados a novas moradias

Fonte: Muratori; Dal Bó (2014).

Segundo Osório (2020), os sistemas domésticos podem ser agrupados em seis categorias: gerenciamento de energia, controle de temperatura, controle de acesso e segurança, iluminação, janelas e aparelhos, sistemas de entretenimento audiovisual, saúde e vida assistida. Conforme observado por Bolzani (2014), os domicílios do século XXI apresentam uma variedade de cabeamentos e dispositivos autônomos para execução de tarefas específicas. Isso inclui sistemas de telefonia interna, informática, rede elétrica com controle de cargas e distribuição, monitoramento de falhas, sistema de geração de emergência e tarifas setORIZADAS.

No que diz respeito à iluminação, são contempladas iluminações tradicionais, decorativas, externas e cenas de iluminação, enquanto o controle predial inclui elevadores e aspiração central. Os sistemas hidráulicos e de gás englobam aquecimento de água, poços, saunas, tratamento de água e esgoto, além de sistemas de irrigação e distribuição de gás (Aureside, 2020).

O entretenimento residencial envolve equipamentos como home theater, TV por assinatura, distribuição de vídeo, áudio ambiente e jogos eletrônicos, enquanto a climatização compreende ar-condicionado, ventilação e controle de janelas, cortinas e persianas (Prudente, 2021).

Os principais sistemas de automação residencial, conforme categorizados por Osório (2020), incluem segurança (alarmes, monitoramento, circuito fechado de TV, controle de acesso), entretenimento (home theater, áudio e vídeo distribuídos, TV por assinatura), controle de iluminação, home office (telefonia e redes) e ar condicionado e aquecimento.

Segundo as pesquisas conduzidas por Teza (2020), destaca-se que a automação em ambientes prediais e residenciais visa principalmente identificar tecnologias capazes de automatizar diversas tarefas rotineiras dentro de edifícios ou casas.

Pereira (2014) complementa afirmando que a eficácia de um projeto de automação residencial está diretamente ligada à facilidade de uso da interface pelo usuário final. Isso possibilita ao cliente desfrutar de uma série de benefícios, tais como economia, segurança, comodidade, conforto, entretenimento, confiabilidade, rapidez e interatividade.

2.1.2 Equipamentos aplicados a automação residencial

A automação residencial, também conhecida como domótica, é um tema cada vez mais presente no dia a dia da sociedade contemporânea. Essa tecnologia está quebrando paradigmas em relação à utilização de recursos tecnológicos. Anteriormente vista como acessível apenas para determinadas classes sociais, hoje em dia é uma realidade acessível a todos (Pereira, 2014).

De acordo com Teza (2020), a evolução da tecnologia tem sido rápida e constante, especialmente desde a década de 70. As principais inovações nesse campo sempre estiveram direcionadas para melhorar a qualidade de vida e facilitar as tarefas cotidianas das pessoas. Essas melhorias têm o intuito de agregar valor e simplificar a vida de milhares de indivíduos.

Nos anos 90, houve um aumento significativo no acesso às tecnologias, o que contribuiu para uma maior aceitação da automação residencial tanto em lares quanto em ambientes de trabalho. No entanto, foi apenas no início do século XXI que a automação residencial se tornou concreta nos lares brasileiros de alto padrão. Isso ocorreu apesar dos desafios relacionados à disponibilidade de mão de obra especializada e aos custos elevados de implementação e manutenção (Teza, 2020).

Atualmente, as automações residenciais são cada vez mais comuns. Desde as mais simples, como portões elétricos e acendimento automático de lâmpadas por sensores de presença, até aquelas que envolvem o uso de smartphones para diversas atividades, proporcionam maior comodidade e segurança aos usuários (Prudente, 2021).

Dessa forma, uma definição mais precisa da domótica seria a sua integração com a eletricidade, eletrônica e tecnologias da informação no ambiente residencial. Isso permite a gestão, tanto local quanto remota, e oferece uma ampla gama de aplicações nas áreas de segurança, conforto, comunicação e gestão de energia ((Oliveira; Borges, 2019).

As residências inteligentes têm como objetivo principal facilitar o dia a dia e promover o bem-estar dos moradores, oferecendo maior conforto e comodidade. Além disso, buscam aumentar a eficiência na segurança, controle e uso de energia, climatização do ambiente, irrigação adequada de jardins e outras medidas para tornar a vida dos usuários mais simples (Muratori; Dalbó, 2020).

Juntamente com esses benefícios, há a capacidade de reconfigurar as tarefas previamente programadas de acordo com as preferências e hábitos dos novos moradores. Isso permite uma adaptação amigável das funções do controlador central, evidenciando que são os usuários que estão no comando da tecnologia e não o contrário (Prudente, 2021).

Ao optar pela automação de uma residência, é notável o conforto proporcionado, especialmente diante das atividades cotidianas que podem ser programadas para simplificar a rotina. Por exemplo, é possível configurar caminhos de iluminação ao chegar em casa, desligar automaticamente todas as luzes ao dormir, ativar o sistema de irrigação do jardim caso não tenha chovido no dia anterior, e controlar a temperatura da água da caldeira para garantir um banho sempre agradável (Muratori; Dal, 2020).

2.1.3 Principais protocolos utilizados na domótica

O protocolo é o meio pelo qual as partes se comunicam em um acordo comum, permitindo assim a comunicação de todo o sistema de automação residencial. Devido à variedade de dispositivos, a comunicação entre eles é viabilizada através de regras e convenções estabelecidas. Portanto, o protocolo abrange um conjunto de diferentes padrões de comunicação que devem ser analisados em cada caso para determinar o mais adequado para a situação em questão (Accardi; Dodonov, 2020).

O protocolo X-10 é o tipo mais antigo utilizado na área de Domótica, desenvolvido em 1978 com o propósito de transmitir dados em linhas de baixa tensão, em baixa velocidade e com custo acessível. Esta tecnologia apresenta um preço altamente acessível e simplicidade para instalação, sendo líder no mercado residencial norte-americano (Oliveira; Borges, 2019).

O EIB foi criado com o objetivo de criar uma barreira à importação de tecnologias semelhantes dos Estados Unidos e do Japão, desenvolvendo um sistema de comunicação entre os dispositivos de uma instalação. Esse protocolo é caracterizado por uma arquitetura descentralizada, transmitindo dados por cabos telefônicos, redes Ethernet, sinal de radiofrequência e infravermelho (Lins; Moura, 2020).

O Lonworks surgiu em 1992 com a promessa de implementar redes de controle distribuídas e automatizadas, restritas a edifícios administrativos, hotéis e indústrias. Porém, seu alto custo o torna inviável para aplicações residenciais. É mais utilizado em locais onde é exigida confiabilidade e robustez, destacando-se pela distribuição da inteligência entre sensores e atuadores, abrangendo desde o nível físico até o nível de redes de controle (Lins; Moura, 2020).

O protocolo SMTP é responsável pelo envio de mensagens eletrônicas através da internet. Durante a autenticação, o protocolo TELNET é utilizado, seguido por uma sequência de comandos para o envio do correio eletrônico para o servidor. O remetente SMTP estabelece um canal de transmissão com o servidor, que pode ser o destino final ou intermediário do envio (Cecato, 2020).

O protocolo HTTP, surgido em 1989, tem como objetivo facilitar a citação de trabalhos em artigos científicos. É o protocolo mais importante da camada de aplicação das pilhas TCP/IP. Nesse caso, o navegador interpreta a mensagem enviada pelo usuário e monta uma página da web correspondente (Cecato, 2020).

De modo geral, as redes se ajustam a arquiteturas determinadas nas quais se explicam as funções e os procedimentos utilizados na sua comunicação. As arquiteturas de comunicação principais são decorrentes do modelo *Open System Interconnection* (OSI) desenvolvido pela *International Organization of Standardization* (ISO), e também o *System Network Architecture* (SNA) da IBM e a *Dec. Network Architecture* (DNA) da *Digital Equipment Corp.*, entre outros. As arquiteturas citadas por último – mais antigas que a própria elaboração do modelo de referência OSI – adaptou seus sistemas de modo a se aproximarem dos modelos padronizados (Diaz, 2019).

O comitê 802 do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), foi quem padronizou os protocolos de rede. Esse trabalho abrange a fiação, a sinalização e os esquemas de acesso ao meio físico das redes, o esquema foi aproveitado pelo modelo OSI (Rocha, 2019).

Diversas modalidades de conexão podem ser adotadas nos sistemas IoT. Na figura 2 são apresentados alguns exemplos, desde o esquema básico entre *smartphone* e disposi-

tivo IoT até a conexão remota de um *smartphone* e uma rede de dispositivos de controle com protocolo *ZigBee*, nesse caso com servidor de aplicação em nuvem (Diaz, 2019).

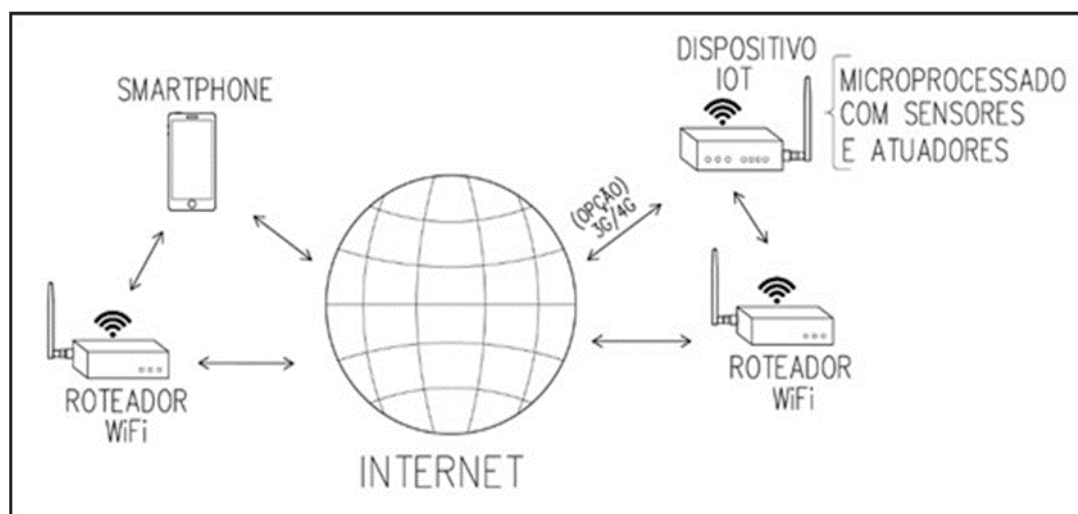


Figura 1. Esquema básico de controle do protocolo *Zigbee*

Fonte: Diaz (2019).

A conexão de comunicação com a internet pode ser estabelecida entre o smartphone e o roteador Wi-Fi, aproveitando o alcance dessa rede, ou entre o smartphone diretamente na internet através do chip 2G/3G do aparelho, se for o caso. Isso significa que, se o celular não estiver ao alcance da rede do roteador, poderá se conectar através do seu cartão Módulo de Identificação do Assinante (SIM) com a rede internet (Diaz, 2019).

Após a proliferação das conexões IPs, surgem as soluções próprias da internet das coisas, ou seja, a inclusão no sistema de automação residencial de instalações de menor porte, com menor densidade de pontos e de instalações mais simples. Trata-se de um indicador de que a automação residencial está inserida no contexto das inovações tecnológicas de última geração (Aureside, 2020).

Segundo Santos (2018), as controladoras autônomas de aplicações específicas na área da IoT não serão mais instaladas no interior de quadros de controle, mas sim na parede, como se fossem um roteador Wi-Fi. As controladoras, conforme o esquema da figura 5, podem construir sistemas de poucas unidades independentes conectadas à internet ou sistemas interligados com a rede de um BMS.

Para Muratori (2014), a instalação será simplificada devido à ausência de fiação de comunicação, sendo necessário apenas interligar a fiação de E/S entre o equipamento controlado e a unidade controladora, além da alimentação auxiliar. Quando for possível utilizar sensores e atuadores Wi-Fi, essas conexões também serão imediatas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo explorou a interação entre a automação residencial e a Internet das Coisas (IoT), destacando como essa integração pode transformar ambientes domésticos em espaços mais inteligentes e eficientes. A pesquisa também apresentou modelos de dispositivos inteligentes e analisou os principais protocolos de comunicação utilizados na domótica, fornecendo uma compreensão abrangente das oportunidades e desafios associados a essa tecnologia.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas ao longo do estudo. A pesquisa

se concentrou principalmente em dispositivos e protocolos disponíveis no mercado, sem considerar as inovações emergentes que podem surgir no futuro. Além disso, a análise das aplicações práticas da IoT na automação residencial foi restrita a cenários específicos, o que pode não refletir a diversidade de experiências dos usuários em diferentes contextos.

A resposta ao problema de pesquisa revelou que o avanço dos sistemas de automação e controle, aliado à IoT, tem o potencial de otimizar projetos de automação residencial, oferecendo benefícios significativos em termos de conforto, segurança e eficiência energética. No entanto, desafios como a segurança dos dados e a interoperabilidade entre diferentes dispositivos ainda precisam ser abordados de forma mais rigorosa.

Propostas para trabalhos futuros incluem a investigação de novas tecnologias emergentes que podem complementar ou substituir os sistemas existentes, além de estudos de caso que analisem a implementação de soluções de automação em ambientes residenciais variados. Além disso, é importante explorar o papel da educação e conscientização dos usuários em relação às tecnologias da IoT, a fim de maximizar seus benefícios e minimizar os riscos associados.

REFERÊNCIAS

- ARGENTA, Celice AM et al. **Desenvolvimento de um Sistema de Automação Residencial com a Aplicação de Android e Arduino**. Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação, v. 18, n. 2, 2020.
- BOLZANI, Caio A. Morais. **Análise de Arquiteturas e Desenvolvimento de uma Plataforma para Residências Inteligentes**. São Paulo/SP: PUC/SP, 2015, 155 p.
- BOLZANI, Caio A. Morais. **Residências Inteligentes**. 1ª ed. 2014. São Paulo/SP: Livraria da Física, 2014, 332 p.
- DAL BÓ, Paulo Henrique; MURATORI, José Roberto. **Automação Residencial: Conceitos e Aplicações**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora Educere Ltda., 2014.
- D'ANGELO, T. **Sistema Domótico de baixo custo via Android e Arduino simulado em uma maquete automatizada**. 1. ed. Minas Gerais. 2014. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto.
- DIAZ, Jaime. **Automação predial: a automação predial na quarta revolução**. 1. Ed. Editora GAESE: São Paulo, 2019.
- MURATORI, J. Roberto; DAL BÓ, P. Henrique. **Automação Residencial. O Setor Elétrico: Artigos**. 2020.
- OLIVEIRA, Fernando; BORGES, Rafael. Eduardo Augusto. **Sistema de automação residencial utilizando a tecnologia ESP32 como alternativa de baixo custo**. Engenharia de Computação, n. 1, 2019.
- OSÓRIO, A. de Souza; et al. **Automação Residencial**. Natal/RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2020, 15 p.
- PEREIRA, Eduardo Henrique Hortencio et al. **Soluções inteligentes e de baixo custo para a automação residencial utilizando smartphones**. 2014. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. PRUDENTE, Francesco. Automação Predial e Residencial: Uma Introdução. 1ª ed. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2021, 211 p.
- ROCHA, Lucas Vinícius da Silva. **Automação residencial: microcontrolador arduino através de uma aplicação web**. 2019.
- TEZA, Vanderlei Rabelo. **Alguns aspectos sobre a automação residencial – Domótica**. 2020. Pós-Graduação – Ciência da Computação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2020.

Resumo

A Indústria 4.0 representa uma revolução significativa na maneira como os processos produtivos são gerenciados, impulsionada pela integração de tecnologias digitais, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e big data. Este estudo revisa a literatura existente sobre a automação e controle dentro desse novo paradigma industrial, com foco nas inovações que transformam a gestão da produção e da manutenção. A análise revela que a automação na Indústria 4.0 não apenas aumenta a eficiência operacional, mas também permite uma abordagem mais proativa e preditiva na gestão da manutenção de equipamentos. A conexão de sistemas e a capacidade de monitoramento em tempo real melhoram a capacidade de identificar falhas antes que ocorram, resultando em menor tempo de inatividade e otimização de recursos. No entanto, a implementação dessas tecnologias enfrenta desafios, como a necessidade de investimento em infraestrutura e a capacitação da força de trabalho. A revisão destaca a importância de adaptar as práticas de automação e controle às especificidades de cada setor industrial, promovendo uma integração harmoniosa entre tecnologia e operação. Este estudo conclui que a contínua pesquisa e desenvolvimento são essenciais para maximizar os benefícios da automação na Indústria 4.0, sugerindo áreas para investigações futuras.

Palavras-chave: Industria 4.0. Automação Controle. Internet das Coisas. Bigdata.

Abstract

Industry 4.0 represents a significant revolution in the way production processes are managed, driven by the integration of digital technologies such as Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI) and Big Data. This study reviews the existing literature on automation and control within this new industrial paradigm, focusing on innovations that transform production and maintenance management. The analysis reveals that automation in industry 4.0 not only increases operational efficiency, but also allows a more proactive and predictive approach in equipment maintenance management. Systems connection and real-time monitoring capacity improve the ability to identify failures before they occur, resulting in lower inactivity and resource optimization time. However, the implementation of these technologies faces challenges, such as the need for infrastructure investment and the workforce's training. The review highlights the importance of adapting automation and control practices to the specificities of each industrial sector, promoting harmonious integration between technology and operation. This study concludes that continuous research and development are essential to maximize the benefits of automation in industry 4.0, suggesting areas for future investigations.

Keywords: Industry 4.0. Automation Control. Internet of Things. Big Date.

1. INTRODUÇÃO

A história da indústria é marcada por notáveis avanços e evoluções, desde os primórdios da invenção da máquina a vapor, que catalisou a transição do trabalho artesanal para o industrial, até os dias atuais, onde testemunhamos uma produção impulsionada pela alta tecnologia. A Indústria 4.0 tem sido amplamente discutida como uma revolução tecnológica que está transformando os processos industriais em todo o mundo. Dentro desse contexto, a automação e o controle desempenham papéis fundamentais na otimização de processos, aumento da eficiência e melhoria da qualidade na produção industrial (Costa, 2018).

Ao longo do tempo, inovações foram surgindo e transformando equipamentos, processos de produção e cadeias de valor, além de aprimorar significativamente a comunicação entre os diferentes setores industriais. Esse constante processo de evolução tem resultado em um mercado cada vez mais exigente e competitivo, que constantemente busca por novos produtos e métodos de produção (Silveira; Lima, 2014).

A relevância desta pesquisa reside na sua capacidade de fornecer insights valiosos para acadêmicos e profissionais da indústria. Ao analisar criticamente a literatura existente sobre automação e controle na Indústria 4.0, é possível identificar lacunas de conhecimento, áreas subexploradas e tendências emergentes (Rosário, 2015).

Torna-se necessário compreender o cenário das indústrias, começando pelos desafios enfrentados na modernização do setor. Devemos analisar os impactos que essas mudanças trarão tanto para as indústrias quanto para os trabalhadores e para o sistema como um todo. No entanto, após uma análise dos desafios, torna-se evidente a necessidade de identificar as oportunidades para a implementação da indústria 4.0, compreendendo os benefícios que podem ser alcançados e os caminhos que devem ser percorridos para atingir esses objetivos.

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, representa uma ampla gama de tecnologias avançadas, como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem, que estão transformando os processos produtivos e os modelos de negócios globalmente. Nesse contexto de crescente digitalização e avanços tecnológicos na indústria, quais os benefícios da automação na indústria 4.0?

O objetivo geral deste artigo é compreender os procedimentos e as vantagens da automação integrada na Indústria 4.0, um avanço tecnológico que envolve a interconexão de sistemas e processos. Especificamente, busca-se entender os conceitos fundamentais da automação, descrever os elementos envolvidos, e analisar as vantagens e obstáculos que se apresentam com a implementação da automação nesse contexto industrial emergente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Aca-

dêmico, Scielo, Lilacs e no banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica, de forma que as teorias levantadas conduziram à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área de automação, Martelli (2016), Costa (2018), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise.

2.2 Resultado e Discussão

O ponto de origem da automação industrial não é facilmente discernível, mas é claro que, para que a automação industrial se desenvolva, é preciso, em primeiro lugar, ter uma indústria estabelecida, juntamente com processos automatizados e autocontroláveis. Nesse sentido, é razoável inferir que os primórdios da automação industrial remontam ao século XVIII, coincidindo com a invenção da máquina a vapor na Inglaterra, um avanço que impulsionou significativamente a produção de bens manufaturados e marcou o início da Revolução Industrial (Silveira; Lima, 2014).

De acordo com Martelli (2016), somente quase três décadas após o início da Revolução Industrial é que se encontra o registro do que pode ser considerado o primeiro sistema de controle na automação industrial. Tal sistema foi concebido por James Watt e, basicamente, consistia em um mecanismo de controle de vapor baseado na interação de forças centrífugas em duas esferas.

2.2.1 Conceito da automação industrial

A habilidade de combinar lógica discreta e analógica é uma ferramenta crucial no controle de processos, especialmente em processos batelada. A utilização de sequenciadores lógicos permite a execução de sequências completas de partida e parada, enquanto o controle analógico é mantido durante a operação do processo (Ribeiro, 2015).

A automação é definida como o conjunto de métodos pelos quais sistemas ativos são formados, capazes de operar com eficiência máxima ao utilizar informações recebidas do ambiente no qual atuam. Esses sistemas são capazes de calcular ações corretivas com base nessas informações, funcionando de maneira semelhante a um operador humano, que utiliza informações sensoriais para tomar decisões apropriadas (Rosário, 2015).

Segundo Groover (2014), a automação é um processo que permite a execução de atividades de forma autônoma. De forma mais ampla, pode-se definir automação como a integração de conhecimento que substitui a observação, esforços e decisões humanas por equipamentos e softwares desenvolvidos com base em especificações funcionais e tecnológicas, utilizando metodologias adequadas.

De acordo com Rabelo (2017), a automação industrial envolve a substituição de tarefas anteriormente realizadas por operadores humanos por elementos tecnológicos, garantindo segurança e qualidade, mesmo diante de possíveis eventualidades. Com o tempo, diversos setores industriais, incluindo produção, geração de energia e transporte, têm demandado cada vez mais sistemas e máquinas automatizadas devido ao aumento da produção, à redução dos custos de automação e máquinas, à melhoria da qualidade e estabilidade dos produtos e à necessidade de substituir trabalhos perigosos e monótonos anteriormente realizados por operadores.

Um sistema de automação é composto por componentes básicos: sensoriamento, comparação e controle, e atuação. Esses componentes funcionam em conjunto, onde o sensoriamento obtém dados de entrada, a comparação e controle os processa e armazena, e a atuação produz as saídas desejadas (Coelho, 2016).

2.2.2 Definições e Aspectos da indústria 4.0

De acordo com Aquarias (2021), o conceito de revolução está intrinsecamente ligado ao princípio de aceleração no tempo, de caráter universal e constante, assim como ao surgimento de algo novo e até então inédito, o que naturalmente acarreta na rejeição do passado como valor para o presente.

Segundo Raposo (2018), quando aplicado ao contexto industrial, as revoluções industriais representam mudanças rápidas e profundas que impulsionam a indústria a um patamar de maior qualidade e produtividade, algo que só seria alcançado após extensas pesquisas e anos de desenvolvimento.

Muitos estudiosos afirmam que estamos presenciando o início da 4ª Revolução Industrial nos tempos modernos. Dessa forma, as revoluções industriais são geralmente identificadas pelo conjunto de inovações e avanços tecnológicos que as caracterizam. No caso da 1ª Revolução, esta foi marcada pelo advento do tear mecânico e outros dispositivos mecânicos destinados à produção de bens, inicialmente impulsionados pela força da água e posteriormente pelo vapor, no final do século XVIII (Carvalho; Duarte Filho, 2018).

Por conseguinte, cada revolução industrial representa um marco na história da humanidade, impulsionando o desenvolvimento econômico e social e moldando profundamente a forma como vivemos e trabalhamos. É crucial compreender o papel das revoluções industriais para antecipar e adaptar-se às mudanças em curso, garantindo assim uma transição suave para os novos paradigmas industriais e tecnológicos (Oliveira; Bertini, 2014).

De acordo com Venturelli (2021), a primeira revolução industrial, que se estendeu por aproximadamente dois séculos (1712-1913), foi marcada pela criação da linha de produção em massa por Henry Ford, dando origem à produção em escala e tornando os produtos mais acessíveis à massa trabalhadora. Esse período é muitas vezes considerado como a segunda Revolução Industrial.

Carvalho e Duarte Filho (2018) complementam que a segunda Revolução Industrial, que durou cerca de 60 anos (1913-1969), foi caracterizada pelo avanço da produção em massa alimentada por energia elétrica e pelo início da automação, com a introdução de computadores nas fábricas. Isso resultou em melhorias na qualidade dos produtos, aumento da produção e gestão de custos mais eficiente.

A terceira Revolução Industrial, conforme mencionado por Hurwitz (2020), ocorreu a partir da década de 70 e foi marcada pela automação das operações de manufatura, utilizando eletrônica e Tecnologia da Informação. Essa fase durou cerca de 40 anos (1969-2010) e preparou o terreno para uma nova era, onde a internet desempenha um papel central na integração de tecnologias e na comunicação entre elas.

Maura (2019) enfatiza que a Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, é uma evolução natural dessas transformações industriais anteriores. Surgiu no início do século XXI e é caracterizada pela integração de tecnologias como sistemas cibernéticos e Internet das Coisas para tornar as fábricas mais inteligentes e eficientes.



Esteves (2016) destaca que a Indústria 4.0 não é apenas um conceito isolado, mas sim um conjunto de tecnologias e definições que, quando combinadas, oferecem inúmeros benefícios para a indústria. O termo foi introduzido em 2011 na Feira de Hannover, na Alemanha, e desde então tem sido adotado em todo o mundo como uma estratégia para impulsionar a inovação e a eficiência na produção.

Rübmann (2015) observa que a Indústria 4.0 visa tornar as fábricas mais heterogêneas e inteligentes, promovendo uma maior interconexão entre humanos e máquinas e otimizando as etapas produtivas para reduzir custos e aumentar a eficiência.

Sugayama e Negrelli (2015) ressaltam que muitas empresas, com o apoio de governos e organizações, estão investindo em soluções baseadas no conceito da Indústria 4.0, reconhecendo-a como uma nova era industrial com implicações estratégicas para as economias globais.

Coelho (2016) destaca que a Indústria 4.0 se baseia em sistemas cibernéticos, Internet das Coisas e outras tecnologias para tornar as fábricas mais autônomas e eficazes, melhorando a adaptação, a eficiência dos recursos e a conexão em todas as fases do processo industrial.

De acordo com Gutierrez (2015), os princípios fundamentais da Indústria 4.0 são seis, e cada um desempenha um papel crucial na implementação eficaz da quarta revolução industrial. O primeiro princípio é a capacidade de operação em tempo real, que envolve a aquisição e o processamento de dados em tempo real, permitindo decisões instantâneas. A virtualização é outro princípio essencial, que consiste na criação de uma réplica virtual das fábricas inteligentes, possibilitando rastreabilidade e monitoramento remoto.

A descentralização, conforme complementado por Rübmann (2015), é outro princípio-chave, onde as decisões são distribuídas pelos sistemas ciber-físicos, permitindo uma resposta ágil às demandas de produção em tempo real. A orientação de serviços é destacada como um princípio adicional, envolvendo o uso de arquiteturas de software orientadas a serviços para adaptar as operações do produto às necessidades específicas dos consumidores, aproximando a oferta de bens dos serviços personalizados.

A modularidade, como mencionado por Roscuo (2015), é crucial para permitir a produção conforme a demanda, com o acoplamento e desacoplamento de módulos na produção, aumentando a flexibilidade e a capacidade de adaptação a mudanças repentinas. A interoperabilidade, refere-se à comunicação constante entre sistemas ciber-físicos e seres humanos, facilitada pela Internet das Coisas.

Além disso, Williamson (2015) destaca a importância da capacidade de reação em tempo real a eventos em toda a cadeia de valor, com decisões baseadas na integração de diversos sistemas. A automação desempenha um papel vital na organização dos processos produtivos, facilitando o trabalho humano e, em alguns casos, substituindo-o, o que é aplicável a uma variedade de indústrias, incluindo farmacêutica, automotiva, mineração, entre outras.

Aquarius (2021) enfatiza os benefícios significativos da automação e da implantação de tecnologias da Indústria 4.0, que resultam em diferenciais competitivos, mas requerem uma organização cuidadosa, incluindo gestão eficaz, metas operacionais e parâmetros de segurança bem definidos.

2.2.3 Benefícios e Desafios da Automação na indústria 4.0

A Indústria 4.0 é sustentada por uma série de componentes tecnológicos já em uso, cuja integração nos sistemas de produção pode levar ao alcance do padrão 4.0. Um dos

pilares fundamentais é a Internet das Coisas (IoT), que busca conectar objetos à rede mundial de computadores, unindo as redes humanas com as diversas redes de objetos. Esse conceito visa impulsionar mudanças nos padrões de consumo e produção, gerando tendências e incentivando o surgimento de novos negócios para atender à demanda por objetos inteligentes (Santos, 2016).

Segundo Costa (2018), a IoT, como uma das primeiras tecnologias adotadas para resolver muitos problemas, opera através da implementação de sensores em várias partes de um sistema ou cadeia produtiva. Esses sensores coletam dados sobre a cadeia e permitem a identificação de padrões de operação, gargalos de produtividade e falhas no sistema monitorado.

De acordo com Raposo (2018), com o avanço da tecnologia, tanto pessoas quanto empresas estão cada vez mais conectadas, possibilitando também a conexão de objetos. A IoT, surgindo do progresso em áreas como sistemas embarcados, microeletrônica e comunicação, propõe um universo de sistemas físicos embarcados com sensores e atuadores, conectados por redes sem fio e utilizando a internet para comunicação.

A IoT não apenas oferece visibilidade e insights das operações empresariais e ativos, mas também possibilita a conversão de processos operacionais com base em dados coletados ao longo do processo de negócios, através de análises avançadas. Isso resulta em eficiência operacional aprimorada, produtividade aumentada e tempo de inatividade não planejado reduzido (Aquarius, 2021).

Conforme Martelli (2016), a proliferação de dispositivos conectados à rede pela IoT trouxe consigo um grande volume, velocidade e diversidade de dados digitais, conhecidos como Big Data. Essa vasta quantidade de dados é fundamental para a quarta revolução industrial, pois possibilita a obtenção de novos insights que podem impulsionar os negócios, aumentar a produtividade e criar novas oportunidades comerciais.

Os Sistemas Físicos-Cibernéticos (CPS, do inglês *Cyber-Physical Systems*) são sistemas integrados que combinam componentes físicos e digitais, permitindo a interação e coordenação entre processos computacionais e elementos físicos do mundo real (Rabelo, 2017). De acordo com Lueth (2015), os Sistemas Físicos-Cibernéticos diferenciam-se da computação atual, pois visam representar virtualmente toda a planta física, ao invés de recorrer a abstrações. Esses sistemas são caracterizados pela integração entre computação e processos físicos.

Para Lueth (2015), no futuro, pode não haver a necessidade das cinco camadas presentes na arquitetura de automação utilizada. A visão dos Sistemas Físicos-Cibernéticos sugere que os serviços subscreverão automaticamente os dados necessários em tempo real. Na Figura 1, são apresentadas as arquiteturas de “relacionamento” entre sistemas físicos e sistemas virtuais (cibernéticos), comparando as utilizadas atualmente com as que se espera para o futuro, com a adoção de CPS.

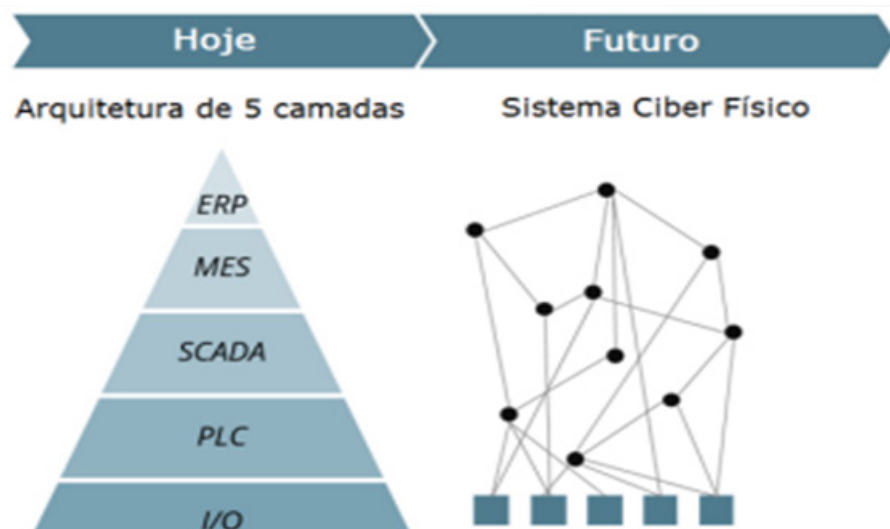


Figura 1. Arquiteturas de automação

Fonte: Adaptado de Lueth (2015).

Esses sistemas são fundamentais na Indústria 4.0, pois possibilitam a conexão e a comunicação em tempo real entre máquinas, sensores e redes, promovendo uma automação avançada e inteligente. Com o uso de CPS, é possível monitorar, controlar e otimizar processos industriais de forma mais eficiente e precisa, aumentando a produtividade e a flexibilidade das operações industriais (Costa, 2023).

O Big Data, ao contrário do que o nome sugere, não se refere apenas ao volume de dados, mas sim à análise desses dados para obter informações valiosas que possam ser convertidas em conhecimento e, por sua vez, em lucro para as empresas. É uma tecnologia que contribui significativamente para a Indústria 4.0, permitindo a tomada de decisões estratégicas com base em dados precisos e em tempo real (Gilchrist, 2016).

De acordo com os autores Silveira e Lima (2014) propõe uma plataforma inteligente para o gerenciamento de ambientes físico-cibernéticos, visando garantir a implementação de processos que seguem as premissas da Indústria 4.0, cujo principal foco é promover a interação, o controle e a autonomia dos agentes atuantes nesses ambientes.

A arquitetura proposta por Estevez (2016) é composta por duas camadas essenciais: a cibernética e a física, conforme ilustrado na Figura 2. A camada cibernética é responsável pelo projeto e planejamento da produção individual de cada pedido, pela avaliação e alocação de recursos de produção e pela orquestração dos recursos físicos.

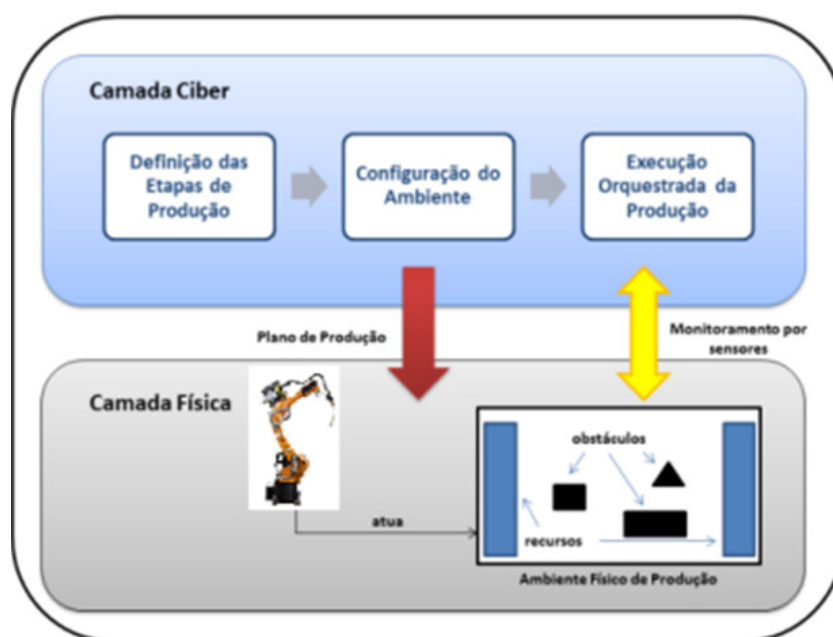


Figura 2. Arquiteturas de automação

Fonte: Adaptado de Costa (2019).

Conforme Ribeiro (2015), a camada física, por sua vez, é composta por um conjunto de robôs, sensores e atuadores. A arquitetura proposta enfatiza o protocolo de comunicação físico-cibernético, pois este requer, primordialmente, um meta-modelo consistente para capturar diferentes informações físicas.

Outro componente importante é a computação em nuvem, que permite às empresas acessar recursos computacionais vastos como um serviço, sem a necessidade de investimentos significativos em equipamentos e suporte técnico. A computação em nuvem simplifica o acesso à informação de maneira descentralizada, facilitando a tomada de decisões estratégicas e contribuindo para o desenvolvimento industrial (Atzori, 2015).

Firjan (2016), a digitalização, por sua vez, envolve o uso de tecnologias digitais para transformar processos produtivos, desenvolvimento de produtos e modelos de negócios, visando maximizar a eficiência nos processos. Isso inclui a adoção de sensores, aquisição e tratamento de dados para melhorar a performance e alcançar os melhores resultados.

A transformação digital, embora exija tempo e recursos, desempenha um papel fundamental na melhoria da performance e na garantia de resultados superiores, tornando a tecnologia uma função estratégica central nos negócios. A digitalização dos processos envolve a transformação de diferentes tipos de informações em valores binários, facilitando a análise e o processamento por computadores (Zhou, 2015).

Os robôs industriais, por sua vez, evoluíram para uma nova geração de robôs autônomos, capazes de sentir o ambiente ao seu redor e operar por longos períodos sem supervisão humana direta. Esses robôs podem aprender novas funções e se auto programarem, possibilitando seu uso em processos de produção flexível (Schun, 2016). Todos esses componentes, desde a IoT até a digitalização e os robôs autônomos, desempenham um papel crucial na transformação da indústria, impulsionando a quarta revolução industrial e moldando o futuro dos processos produtivos e de negócios (Coelho, 2016).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais sobre a automação e controle na Indústria 4.0 destacam a relevância dessa transformação para o setor industrial. A integração de tecnologias digitais avançadas, como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial, tem demonstrado um potencial significativo para melhorar a eficiência operacional e a gestão da manutenção. Essas inovações não apenas otimizam processos, mas também promovem uma abordagem preditiva e proativa, reduzindo os tempos de inatividade e os custos associados.

No entanto, a implementação bem-sucedida da automação na Indústria 4.0 enfrenta desafios consideráveis. A necessidade de investimentos substanciais em infraestrutura e a capacitação da força de trabalho são questões críticas que as empresas devem abordar para garantir uma transição eficaz. Além disso, a resistência à mudança e a adaptação cultural dentro das organizações podem dificultar a adoção dessas tecnologias. Portanto, é fundamental que as empresas desenvolvam estratégias claras para gerenciar esses desafios.

As perspectivas futuras para a automação na Indústria 4.0 são promissoras, com a expectativa de que novas tecnologias e inovações continuem a emergir. Pesquisas adicionais podem explorar a aplicação de técnicas avançadas de machine learning e análise de dados na otimização de processos industriais. Além disso, estudos sobre a interoperabilidade entre diferentes sistemas e plataformas também são essenciais para garantir a eficácia das soluções de automação.

Finalmente, a evolução da automação e controle na Indústria 4.0 requer uma abordagem colaborativa entre empresas, universidades e instituições de pesquisa. A formação de parcerias estratégicas pode facilitar a troca de conhecimento e a implementação de soluções inovadoras. O incentivo à pesquisa e desenvolvimento nessa área é crucial para que as organizações se mantenham competitivas e possam aproveitar ao máximo as oportunidades oferecidas por esse novo paradigma industrial.

REFERÊNCIAS

- AQUARIUS. **Entenda a relação da automação com a Indústria 4.0**. São Paulo: Aquarius, 2021.
- ATZORI, L. A. **Internet das coisas**: uma pesquisa. *Redes de computadores*, v. 54, n. 15, pág. 2787-2805, 2014.
- CARVALHO, E.; DUARTE FILHO, N. **Proposta de um sistema de aprendizagem móvel com foco nas características e aplicações práticas da indústria 4.0**. RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação. 2018.
- COELHO, P. **Rumo a Indústria 4.0**. Coimbra: SIB, 2016.
- COSTA, F. **Identificar e caracterizar as competências necessárias ao profissional de Engenharia e Gestão Industrial para enfrentar a Indústria 4.0**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Mestrado em Engenharia Industrial Especialidade Gestão Industrial, 2018.
- COSTA, Paulo Robson Melo. **Princípios e Cenários da Indústria 4.0: Uma Revisão de Literatura**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. 2019.
- COSTA, Jalisson Tavares. **Práticas de governança de TIC e tecnologias da indústria 4.0 no apoio à gestão de TIC em cidades inteligentes brasileiras diante da pandemia COVID-19**. 2023. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2023.
- ESTEVEZ, R. **Os 9 pilares da Indústria 4.0**. Eco inteligência, 2016.
- FIRJAN. **Internet das Coisas e Indústria 4.0** abrem novos mercados. Rio de Janeiro: Firjan, 2016.
- GILCHRIST, A. **Indústria 4.0: A Internet Industrial das Coisas**. Tailândia: Apress, 2016.
- GUTIERREZ, R.; PAN, S. **Complexo Eletrônico: Automação do Controle Industrial**. Brasília: BNDES, 2015.

- HURWITZ, J. **Computação em nuvem para manequins**. John Wiley & Filhos, 2020.
- LUETH, K. L. *Will the industrial internet disrupt the smart factory of the future? IoT Analytics*: Hamburg, 2015.
- MARTELLI, R. **Automação industrial**. Indaial: Grupo UNIASSELVI, 2016.
- OLIVEIRA, D.; BERTINI, F. **Avaliação de Segurança em Redes de Automação**. Jundaí, São Paulo, 2014.
- RABELO, A. **Transformação Digital**: o que é e quais os seus impactos na sociedade. São Paulo, 2017.
- RAPOSO, D. **Indústria 4.0**: Realidade, mudanças e oportunidades. Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais, 2018.
- RIBEIRO, E. **Automação Industrial**. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria Ltda, 2015.
- ROGGIA, L; FUENTES, R. **Automação industrial**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- ROSÁRIO, J. **Princípios de mecatrônica**. São Paulo: Pearson, 2015.
- RÜBMANN, P. **Indústria 4.0**: O futuro da produtividade e crescimento nas indústrias de manufatura. Boston Consulting Group. Boston, p. 20. 2015.
- SANTOS, B. **Internet das coisas**: da teoria à prática. Minicursos SBRC Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, v. 31, 2016. SAS, S. Big Data, o que é e por que é tão importante. São Paulo: Insights. 2016.
- SCHUN, T; POTENTE, C. **Mecanismos de Colaboração para Aumentar a Produtividade no Contexto da Indústria 4.0**. In Procedia CIRP, 2016.
- SILVEIRA, L; LIMA, W. **Um breve histórico conceitual da Automação Industrial e Redes para Automação Industrial**. Monografia, UFRN. Natal, 2014.
- VENTURELLI, M. Indústria 4.0: **Uma Visão da Automação Industrial**. São Paulo: Automação Industrial, 2021.
- ZHOU, T. LIFENG, Z. **Indústria 4.0**: Rumo a futuras oportunidades e desafios industriais”, 2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), Zhangjiajie, 2015.

Resumo

A automação industrial tem gerado transformações significativas em diversos setores, afetando diretamente o ambiente de trabalho e a vida das pessoas com deficiência. Com o avanço das tecnologias assistivas, como robôs colaborativos, inteligência artificial e sistemas de controle automatizados, novas oportunidades surgem para incluir esses indivíduos no mercado de trabalho e promover sua independência. Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho foi discutir a importância do processo de automação para o público que possui algum tipo de deficiência. Para isso, a metodologia abordada foi a Revisão Bibliográfica, a qual buscou-se fundamentos em livros, artigos, dissertações, monografias e teses que discorressem sobre o assunto. Dessa forma, foi possível compreender que, a automação industrial oferece grandes oportunidades para melhorar a qualidade de vida e a inclusão das pessoas com deficiência, mas para que seus benefícios sejam amplamente percebidos, é necessário um esforço contínuo para garantir que essa tecnologia seja acessível e adaptável a todos.

Palavras-chave: Automação Industrial. Transformações. Avanço. Deficiência.

Abstract

Industrial automation has generated significant transformations in several sectors, directly affecting the work environment and the lives of people with disabilities. With the advancement of assistive technologies, such as collaborative robots, artificial intelligence, and automated control systems, new opportunities arise to include these individuals in the labor market and promote their independence. Thus, the general objective of this work was to discuss the importance of the automation process for the public that has some type of disability. For this, the methodology addressed was the Bibliographic Review, which sought foundations in books, articles, dissertations, monographs and theses that discussed the subject. In this way, it was possible to understand that industrial automation offers great opportunities to improve the quality of life and inclusion of people with disabilities, but for its benefits to be widely realized, a continuous effort is needed to ensure that this technology is accessible and adaptable to all.

Keywords: Industrial Automation. Transformations. Advance. Deficiency.

1. INTRODUÇÃO

A automação industrial é uma ferramenta capaz de garantir lucro e redução de gastos ao mesmo tempo, isso porque ela garante a autonomia dos processos de fabricação, além de reduzir o esforço humano ao máximo, cortando assim, custos operacionais e despesas com possíveis falhas.

Isso ocorre devido ao uso de tecnologias de software, hardware e equipamentos específicos utilizados em processos de produção. Nesse viés, com a substituição da mão de obra humana por máquinas capazes de desempenhar as mesmas funções e até outras consideradas mais perigosas, obtêm-se um aumento na lucratividade do setor, bem como uma maior redução de custos e falhas, sem deixar de lado a segurança dos trabalhadores.

Sendo assim, a implantação da automação dentro de uma indústria possibilita benefícios, como por exemplo: a redução de custos, uma maior segurança operacional, colabora na abordagem dos pontos inseguros, gera mais lucro etc. Nesse sentido, prevê-se que as empresas que implementam tecnologias de automação percebam rapidamente um aumento significativo na produtividade e uma diminuição nos gastos com a implementação correta (BITKOM; VDMA, 2016, p. 45).

Pode-se ainda destacar os impactos causados pela automação na vida dos deficientes, uma vez que, com a implantação da automação, além de facilitar um trabalho que, dependendo do tipo de deficiência do trabalhador, seria de difícil realização para o mesmo. Essa tecnologia possibilita que o empregador contrate um maior número de funcionários com deficiência, visto que, a tarefa será apenas guiada pelo mesmo.

Desse modo, a proposta de pesquisa deste trabalho baseou-se em buscar informações sobre o processo de automação e de que maneira ele afeta a vida dos deficientes, tendo em vista que, essa ferramenta pode mudar vidas e até mesmo contribuir para uma indústria mais acessível.

Sendo assim, analisando-se a importância da automação para a vida dos deficientes, com o intuito de compreender sua relevância e impactos nesse aspecto, além de contribuir para a construção de uma indústria mais acessível, buscou-se por meio desta pesquisa responder ao seguinte questionamento: Qual a relevância e os impactos da automação industrial na vida do deficiente?

Nesse viés, vale ressaltar que, uma indústria que investe na segurança e acessibilidade de seus colaboradores reduz seus gastos, visto que com a redução de tarefas pesadas que seriam realizadas por pessoas diminui-se o índice de acidentes, sem contar que as máquinas poderão realizar tarefas consideradas perigosas para os trabalhadores.

Portanto, o presente estudo contribuiu de maneira clara e objetiva para demonstrar a relevância do uso da automação industrial na vida das pessoas com deficiência, como forma de redução de custos dentro das indústrias, destacando seus benefícios e contribuições para tornar o ambiente mais acessível.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente trabalho possui caráter qualitativo e tem como principal objetivo discutir a

importância do processo de automação para pessoas com algum tipo de deficiência. Para alcançar esse propósito, foi adotado o método de revisão de literatura, caracterizado como uma pesquisa qualitativa e descritiva. A investigação foi realizada por meio da análise de livros, artigos científicos e monografias, com o apoio das seguintes bases de dados: SciELO, Periódicos CAPES e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD). Foram considerados estudos publicados nos últimos dez anos. As palavras-chave utilizadas na busca foram: *Automação Industrial*, *Transformações*, *Avanço* e *Deficiência*.

2.2 Resultados e Discussão

Com o desenvolvimento de uma sociedade que depende da indústria para suas necessidades básicas foi necessário o aperfeiçoamento das ferramentas para que pudessem se encaixar nesse novo contexto. De acordo com Neumann (2015, p. 13), no passado era comum nas indústrias lidar somente com processos manuais nas realizações das tarefas. Através da Revolução Industrial, no século XVIII, a tecnologia se desenvolveu fazendo com que o trabalho humano se tornasse cada vez mais mecanizado.

Para ampliar a discussão sobre o impacto da mecanização no trabalho humano, Pires (2018) argumenta que, com o advento da Revolução Industrial, houve uma mudança não apenas na forma como as tarefas eram realizadas, mas também na relação entre o trabalhador e o processo produtivo. O autor aponta que, antes da mecanização, o trabalho era centrado nas habilidades manuais e conhecimentos práticos dos trabalhadores. Entretanto, com o desenvolvimento das máquinas, o trabalho humano passou a ser complementado e, em muitos casos, substituído por processos automáticos, o que resultou em uma redefinição das funções dentro das fábricas. Isso reforça o ponto de Neumann (2015), mostrando como a introdução de tecnologias modificou profundamente o ambiente industrial e as exigências para os trabalhadores.

As revoluções foram essenciais para que a qualidade das máquinas fosse priorizada. Neste sentido, Martins e Silva (2020, p. 16) destaca que, a utilização de máquinas em escala foi possível a partir da Primeira Revolução Industrial, em meados do século XVIII. Desde então, as indústrias vêm aumentando o atributo e credibilidade destes equipamentos para tornar a fabricação cada vez mais precisa e confiável.

Em complemento a esse ponto de vista, Moreira (2019), ressalta que o foco crescente na automação e na eficiência produtiva não apenas impulsionou a mecanização em larga escala, mas também reforçou a necessidade de tecnologias mais robustas e seguras. Segundo Moreira (2019, p. 22), “a busca pela automação eficiente e pela confiabilidade das máquinas está diretamente ligada à pressão das indústrias por redução de custos e aumento da produtividade, fatores essenciais para a competitividade global”.

Dessa forma, o aperfeiçoamento das máquinas juntamente com o trabalho humano de inteligência, realizado dentro das fábricas é a base de uma indústria eficiente. Alguns especialistas consideram a Automação Industrial a “Terceira Revolução Industrial”, que foi a união de processos mecânicos e de tecnologia da informação aplicados à indústria que modificou os parâmetros de produção industrial implantados por Ford e outros iniciadores no século XX. (Martins; Silva, 2020, p. 25).

Nesse contexto, Schwab (2016), que aponta para a Quarta Revolução Industrial, caracterizada pela fusão de tecnologias digitais, físicas e biológicas, trazendo mudanças ainda mais profundas no setor produtivo. Schwab argumenta que, diferente das revoluções anteriores, a automação e a inteligência artificial na indústria atual estão não apenas substi-

tuindo o trabalho físico, mas também processos cognitivos, elevando o papel da automação para novos patamares. Segundo ele, “a Quarta Revolução Industrial está redefinindo o que significa ser produtivo, colocando a interconexão de tecnologias digitais e inteligência artificial no centro do processo industrial” (Schwab, 2016, p. 45).

Esse ponto complementa a ideia de que a união entre tecnologia e trabalho humano é a base de uma indústria eficiente. Contudo, vai além ao sugerir que, na era contemporânea, a automação não se limita à substituição de tarefas repetitivas, mas amplia a capacidade de decisões inteligentes dentro das fábricas, potencializando a eficiência industrial a níveis jamais vistos.

Nessa conjuntura, o desenvolvimento da automação deu-se devido ao avanço acelerado da tecnologia. Para acompanhar o mercado, as organizações necessitaram ser fundamentadas na rápida evolução tecnológica, aderir a novos meios de produção através de máquinas e equipamentos que assegurassem utilizar o mínimo de mão de obra possível (Freitas, 2017, p. 12). É importante destacar que, quanto maior a eficiência das máquinas e menor for o tempo que ela utiliza para realização do seu trabalho, maior será o lucro da indústria que se beneficia dessas ferramentas para garantir sua eficiência.

Uma perspectiva que complementa essa visão é trazida por Pereira (2019, p. 45), que ressalta que, embora a automação seja crucial para a eficiência e a redução de custos, ela também deve ser vista com cautela no que tange à substituição total da mão de obra humana. Segundo o autor, a automação excessiva pode levar à desvalorização das habilidades humanas e à perda de postos de trabalho, especialmente em setores onde a substituição por máquinas é mais viável. Pereira argumenta que o desafio atual é encontrar um equilíbrio entre o uso de tecnologia para melhorar a produtividade e garantir que a mão de obra humana continue a ter um papel significativo nas operações industriais. Dessa forma, enquanto Freitas (2017) aponta para os benefícios da automação na redução de custos, Pereira sugere que é fundamental que as indústrias não negligenciem a importância do fator humano, tanto em termos de emprego quanto de inovação.

Sendo assim, o termo automação é derivado da palavra em latim *Automatus*, que significa mover-se por si. Esse processo é a execução de técnicas computadorizadas ou mecânicas com o objetivo de reduzir a mão-de-obra em qualquer processo, especialmente com o uso de robôs nas linhas de produção. (Martins; Silva, 2020, p. 5).

somente no início do século XX que os sistemas se tornaram inteiramente automáticos. A necessidade de aumento na produção e produtividade fez com que houvesse diversas séries de inovações tecnológicas neste sentido, como máquinas com capacidade de produzir com maior rapidez e precisão, comparado com o trabalho feito à mão e a utilização do vapor como fonte de energia, em substituição à energia muscular (manual) e hidráulica. Foi aproximadamente no ano de 1788 que James Watt criou o que pode ser considerado um dos primeiros sistemas de controle com realimentação (Neumann, 2015, p. 16).

Desse modo, percebe-se que aos poucos a automação foi transformando o trabalho de todas as pessoas da sociedade, inclusive dos trabalhadores com deficiência. Ela vem assumindo uma postura de inclusão social, as pessoas com deficiência têm o mesmo direito que qualquer outro membro da sociedade de aceder a empregos gratificantes (Texeira, 2018, p. 25).

Nesse viés, trabalhadores com deficiências na indústria mostram aspirações de desenvolver habilidades necessárias para ocupar empregos específicos em suas organizações e alcançar satisfação no trabalho (Castro *et al.*, 2015, p. 18). Com a crescente transfor-

mação do trabalho através da automação, abre-se uma oportunidade para tornar os locais de trabalho acessíveis como nunca antes, se for adotada a abordagem correta ao design.

Nesse sentido, Santos e Oliveira (2019, p. 22) afirmam que a inclusão de pessoas com deficiência no ambiente industrial não deve se limitar apenas à adaptação de espaços físicos, mas também à promoção de uma cultura organizacional que incentive o desenvolvimento profissional contínuo. A automação, quando integrada de forma inclusiva, não apenas facilita o acesso a novas funções, mas também permite que os trabalhadores com deficiência adquiram competências técnicas específicas, ampliando suas perspectivas de carreira. No entanto, como destacado pelos autores, o sucesso dessa inclusão depende de um planejamento cuidadoso que considere não só o design dos locais de trabalho, mas também o suporte educacional e treinamento contínuo para esses indivíduos, garantindo que possam competir em igualdade de condições.

Além disso, quando se investe esforço na concepção de locais de trabalho automatizados seguindo os princípios do design para todos (Bitkom, 2016, p. 29), a usabilidade e a acessibilidade universais já estão incorporadas no sistema, e os benefícios chegarão aos utilizadores em todo o âmbito dos possíveis perfis de trabalhadores, independentemente de deficiência.

Dessa forma, destaca-se que para adequar-se a um trabalho específico da indústria, os aspectos mais relevantes do perfil de um trabalhador incluem conjuntos de habilidades, capacidades, preferências, para citar alguns. Tudo isso irá variar dependendo de fatores como idade, experiência, formação cultural e deficiências existentes.

Nesta perspectiva, conceber a automação nos locais de trabalho que também considere os requisitos restritivos dos trabalhadores com deficiência é um fator impulsionador para a obtenção de soluções com uma base amplamente utilizável. As deficiências podem ser motoras, sensoriais, mentais ou cognitivas (muitas vezes uma combinação de algumas delas) (Vilela, 2012, p. 31).

Atualmente, as organizações industriais que oferecem empregos protegidos (Neumann, 2015, p. 22) para trabalhadores com deficiências cognitivas, por exemplo, reprojeta suas linhas de montagem, fragmentando processos em subtarefas simplificadas que são alocadas aos trabalhadores com base em seus perfis (Freitas, 2017, p. 13). Este é um processo caro que não oferece a flexibilidade exigida pela produção de lotes curtos.

Souza e Oliveira (2018) argumentam que, embora a fragmentação dos processos em subtarefas simplificadas seja uma abordagem eficaz para integrar trabalhadores com deficiências, esse método pode ser financeiramente insustentável em longo prazo. Segundo os autores, “a customização de processos produtivos para atender a necessidades específicas de grupos com limitações cognitivas, embora socialmente benéfica, exige altos investimentos iniciais e muitas vezes não se adapta às demandas de produção flexível e ágil que caracterizam o cenário industrial contemporâneo” (Souza; Oliveira, 2018, p. 47). Dessa forma, ambos os autores sugerem que a automação, quando projetada de forma inclusiva desde o início, pode superar esses desafios, possibilitando uma maior adaptação e flexibilidade sem comprometer a inclusão.

Uma solução para a inclusão das pessoas com deficiência na indústria são as ferramentas de tecnologia assistiva (TA). Essas ferramentas são usadas justamente para tentar devolver ou aproximar as habilidades funcionais dessas pessoas às das pessoas sem deficiência. A fisioterapeuta Rita Bersch diz que “A TA deve ser entendida como um auxílio que promoverá a ampliação de uma habilidade funcional deficitária ou possibilitará a realização da função desejada e que se encontra impedida por circunstância de deficiência ou pelo envelhecimento” (Bersch, 2017, p. 12).



Rios e Oliveira (2019) afirmam que, “as tecnologias assistivas desempenham um papel fundamental na promoção da autonomia e da independência das pessoas com deficiência, possibilitando a elas o acesso a ambientes de trabalho e atividades do cotidiano que antes eram considerados inacessíveis” (p. 45). Essa afirmação reforça a ideia de que a TA não só ajuda a restaurar habilidades funcionais, mas também é crucial para a inclusão social e profissional, permitindo que as pessoas com deficiência participem ativamente da sociedade e contribuam de maneira significativa em suas profissões. A integração dessas tecnologias nos ambientes industriais é, portanto, um passo vital para a construção de uma sociedade mais equitativa e inclusiva.

Nesse contexto, pode-se destacar como benefícios da automação para o público deficiente: auxílio para a vida diária e prática; comunicação aumentativa e/ou alternativa; recursos de acessibilidade ao computador; sistemas de controle de ambiente; projetos arquitetônicos para acessibilidade; órteses e próteses; adequação de postura; auxílio de mobilidade; auxílios para qualificação da habilidade visual e recursos que ampliam a informação para pessoas com baixa visão ou cegas; auxílios para ampliação da habilidade auditiva e para autonomia na comunicação de pessoas com déficit auditivo, surdez ou surdocegueira; adequação em veículos e em ambientes de acesso ao veículo; entre outros (Silva, 2012, p. 39).

Dessa forma, tais benefícios são proporcionados pela automação e facilitam a vida e o dia a dia de pessoas com deficiência, tanto em seu ambiente de trabalho, quanto em sua rotina fora dele. Com isso, pode-se destacar a importância dessa ferramenta dentro da indústria e também para esse público, que por vezes, acaba não conseguindo se adequar a um ambiente sem esses recursos.

Vale ressaltar que, a automação industrial emerge como um elemento central na transformação das relações de trabalho, especialmente no que diz respeito à inclusão das pessoas com deficiência. Ao longo do desenvolvimento da indústria, a mecanização das tarefas foi um reflexo da busca por eficiência e produtividade, como evidenciado pelas análises de Neumann (2015) e Martins e Silva (2020). Contudo, à medida que a tecnologia avança, é crucial reconhecer não apenas os benefícios econômicos, mas também as responsabilidades sociais que a automação traz. A inclusão de trabalhadores com deficiência deve ser uma prioridade nas estratégias de automação, conforme sugerido por Texeira (2018) e Castro *et al.* (2015), que destacam a importância do design acessível e das oportunidades de desenvolvimento profissional.

Além disso, a integração de tecnologias assistivas, como mencionado por Bersch (2017) e Rios e Oliveira (2019), é fundamental para garantir que as pessoas com deficiência possam não apenas participar do ambiente industrial, mas também prosperar dentro dele. Esses recursos têm o potencial de nivelar o campo de jogo, proporcionando às pessoas com deficiência a autonomia e as habilidades necessárias para se destacar em suas funções. Portanto, ao projetar ambientes de trabalho, as indústrias devem considerar a usabilidade universal, como sugerido por Bitkom (2016), para assegurar que todos os trabalhadores, independentemente de suas limitações, possam contribuir de maneira eficaz.

Por fim, a discussão em torno da automação deve sempre incluir uma reflexão sobre o papel humano no processo produtivo. Embora a eficiência e a redução de custos sejam objetivos válidos, como destacado por Freitas (2017) e Pereira (2019), não se deve perder de vista a importância das habilidades humanas e da criatividade. O futuro da indústria reside na combinação sinérgica entre a tecnologia e o capital humano, que deve ser valorizado e incentivado. Portanto, é essencial que a automação não apenas promova eficiência, mas também celebre a diversidade e a inclusão, construindo um ambiente de trabalho onde

todos possam se sentir valorizados e capacitados para contribuir para o sucesso coletivo.

3. CONCLUSÃO

Em conclusão, as inovações permitem que tarefas tradicionalmente inacessíveis para pessoas com limitações físicas ou sensoriais sejam realizadas de forma adaptada ou assistida. Por exemplo, robôs podem realizar atividades fisicamente extenuantes, enquanto interfaces controladas por voz ou sensores permitem que trabalhadores com deficiência motora operem máquinas com maior facilidade. Além disso, o design de ambientes de trabalho mais acessíveis, com sistemas automáticos de monitoramento e suporte, contribui para a segurança e o bem-estar desses profissionais.

Por outro lado, o impacto da automação na vida dos deficientes também levanta desafios. A rápida transformação do mercado de trabalho pode exigir um novo conjunto de habilidades que nem sempre está ao alcance de pessoas com deficiência, principalmente aquelas que enfrentam barreiras educacionais e tecnológicas. Portanto, para que a automação industrial tenha um impacto positivo e inclusivo, é essencial que haja investimentos em treinamento, acessibilidade e políticas de inclusão.

Em resumo, a automação industrial oferece grandes oportunidades para melhorar a qualidade de vida e a inclusão das pessoas com deficiência, mas para que seus benefícios sejam amplamente percebidos, é necessário um esforço contínuo para garantir que essa tecnologia seja acessível e adaptável a todos.

REFERÊNCIAS

- BERSCH, Rita. **Introdução à tecnologia assistiva**. 2017. Disponível em: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.assistiva.com.br/Introducao_Tecnologia_Assistiva.pdf. Acesso em: 18 de mai. 2024.
- BITKOM; VDMA; ZVI. **Implementation Strategy Industrie 4.0**: report on the results of the industrie 4.0 platform. Plattform Industrie 4.0 (2013-2015). Frankfurt, Alemanha, 2016.
- CASTRO, Clarizza Ap. Oliveira; et al. **A Gestão estratégica de custos como diferencial competitivo para micro e pequenas empresas**. 2015. Disponível em: www.unifia.edu.br/revista_eletronica/revistas/gestao_foco/artigos/ano2015/gest_estrategica_custos.pdf. Acesso em: 30 de fev. 2024.
- FREITAS, João Mário. **Guia de Estudo – Robótica e Automação**. Varginha: GeaD-UNIS/MG, 2017.
- MARTINS, Eric Couto; SILVA, Miriã Vieira da. **Evolução da automação nas indústrias automobilísticas no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/2020/04/Evolu%C3%A7%C3%A3o-da-Automa%C3%A7%C3%A3o-nas-Ind%C3%BAstrias-Automobil%C3%ADsticas-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 12 de mai. 2024.
- MOREIRA, J. (2019). **Eficiência produtiva e automação: um estudo das indústrias contemporâneas**. Belo Horizonte: Editora Economia.
- NEUMANN, Clóvis; SCALICE, Régis Kovacs. **Projeto de Fabrica e Layout**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- PEREIRA, L. (2019). **O papel da automação na indústria: desafios e oportunidades**. Curitiba: Editora Indústria.
- PIRES, R. (2018). **A Revolução Industrial e suas implicações no trabalho moderno**. Rio de Janeiro: Editora Trabalho.
- RIOS, A., & OLIVEIRA, M. (2019). **Tecnologias assistivas e inclusão no ambiente de trabalho**. São Paulo: Editora Inclusão.
- SCHWAB, K. (2016). **A Quarta Revolução Industrial**. Porto Alegre: Editora FGV.

SILVA, Sérgio Francisco (2012). **Automação Industrial Via Internet:** Uma Abordagem de Software Voltada à Pequena Empresa, Centro Universitário do Triângulo - Unit, Uberlândia - MG.

SOUZA, F., & OLIVEIRA, T. (2018). **Integração de trabalhadores com deficiência na indústria: práticas e desafios.** Salvador: Editora Inclusão.

TEXEIRA, Ana Flávia Serpa; et al. **Automação industrial:** seus desafios e perspectivas. 2018. Disponível em: <http://revista.fepi.br/revista/index.php/revista/article/viewFile/404/278>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

VILELA, Paulo Sérgio da Câmara; VIDAL, Francisco José Targino. **Automação industrial.** 2012. Disponível em: https://www.dca.ufrn.br/~affonso/FTP/DCA447/trabalho1/trabalho1_19.pdf. Acesso em: 30 de fev. 2024.

Resumo

O artigo explora o impacto das tecnologias robóticas na medicina, com ênfase no uso da robótica em cirurgias. A análise inicial foca no contexto histórico da integração da robótica na área médica, ressaltando como essas inovações têm transformado diagnósticos, tratamentos clínicos e terapias. O texto destaca o sistema cirúrgico Da Vinci como uma das principais inovações no campo, proporcionando procedimentos menos invasivos, maior precisão e segurança nos tratamentos. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão de literatura, utilizando artigos científicos e publicações acadêmicas, permitindo uma visão ampla sobre o avanço da robótica no setor de saúde. Os resultados indicam que o uso da robótica tem contribuído significativamente para a melhoria da eficiência cirúrgica, com benefícios diretos na recuperação dos pacientes. Contudo, o estudo também aponta desafios como os altos custos de aquisição e manutenção dos sistemas robóticos, além da necessidade de treinamento especializado para os profissionais envolvidos. Em conclusão, o artigo afirma que, apesar das dificuldades, a robótica na medicina representa uma ferramenta crucial para o futuro da prática cirúrgica. Com potencial para continuar revolucionando o campo, a robótica traz promessas de avanços ainda maiores na precisão e na segurança dos procedimentos médicos, destacando-se como uma área de pesquisa e aplicação em expansão.

Palavras-chave: Robótica. Sistema da Vinci. Automação. Cirurgia médicas.

Abstract

The article explores the impact of robotic technologies in medicine, with an emphasis on the use of robotics in surgeries. The initial analysis focuses on the historical context of the integration of robotics in the medical field, highlighting how these innovations have transformed diagnoses, clinical treatments, and therapies. The text highlights the Da Vinci surgical system as one of the main innovations in the field, providing less invasive procedures, greater precision, and safer treatments. The research was conducted through a literature review, using scientific articles and academic publications, allowing a broad view of the advancement of robotics in the health sector. The results indicate that the use of robotics has contributed significantly to improving surgical efficiency, with direct benefits in patient recovery. However, the study also points out challenges such as the high costs of acquiring and maintaining robotic systems, in addition to the need for specialized training for the professionals involved. In conclusion, the article states that, despite the difficulties, robotics in medicine represents a crucial tool for the future of surgical practice. With the potential to continue revolutionizing the field, robotics brings promises of even greater advances in the precision and safety of medical procedures, standing out as a growing area of research and application.

Keywords: Robotics. Da Vinci System. Automation. Medical surgery.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, o constante desejo de desenvolver soluções capazes de proporcionar benefícios, sustentar a vida e aprimorar a qualidade têm sido uma busca incessante. Essa jornada perdura até os tempos modernos, levando a numerosas descobertas e invenções que elevaram o nível de desenvolvimento tecnológico em diversas esferas da vida, seja no trabalho, em casa, na saúde ou mesmo no entretenimento (Morrell *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a medicina emerge como uma das áreas mais beneficiadas pelo avanço tecnológico, com suas inovações impulsionando diagnósticos mais ágeis e precisos, além de tratamentos clínicos e terapêuticos mais eficazes. A engenharia de controle e automação, especificamente, tem desempenhado um papel crucial nesse progresso, especialmente através da aplicação da robótica (Rocha, 2022).

Essa tecnologia abrange desde a produção de equipamentos médicos até a fabricação de próteses e a realização de cirurgias, promovendo abordagens menos invasivas e procedimentos cirúrgicos mais eficientes, que, por sua vez, contribuem significativamente para uma recuperação mais rápida e eficaz dos pacientes (Gomes, 2021).

A crescente integração da robótica na medicina tem revolucionado os procedimentos cirúrgicos, oferecendo novas perspectivas para a precisão, eficiência e segurança dos tratamentos médicos. A automação em cirurgias médicas representa um dos campos mais promissores dessa convergência entre tecnologia e saúde, permitindo avanços significativos na prática clínica (Amaral, 2021).

O uso da robótica na medicina tem aberto novas possibilidades, desafiando os conhecimentos e habilidades tradicionais e levando a campo a um nível superior. Isso resultou em inovações estabelecidas e avanços significativos nos tratamentos médicos. Portanto, surge a questão: Como o emprego da robótica na medicina influencia o bem-estar humano?

O objetivo geral da pesquisa foi compreender o emprego de tecnologias robóticas nas cirurgias médicas, enquanto os objetivos específicos envolvem descrever o contexto histórico da integração da robótica na medicina, abordando suas origens e evolução ao longo do tempo, além de apresentar as principais características e funções de um sistema robótico cirúrgico Da Vinci.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada foi de natureza qualitativa e descritiva, com foco em uma revisão de literatura. Esse tipo de abordagem permitiu sintetizar informações já disponíveis e chegar a conclusões fundamentadas sobre o tema proposto. O levantamento teórico foi realizado a partir de uma busca bibliográfica em bases de dados acadêmicas, incluindo Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e repositórios de teses e dissertações de universidades brasileiras.

A pesquisa envolveu uma leitura analítica das fontes, de modo que as teorias encontradas pudessem contribuir para responder ao problema de pesquisa. Foram priorizados estudos dos últimos 10 anos para garantir a atualidade das referências, além de livros de

autores reconhecidos na área de robótica médica, como Amaral (2021), Pitassi (2016) e Rocha (2022), com o objetivo de enriquecer a fundamentação teórica e a análise dos dados.

2.2 Resultados e Discussão

A palavra “robô” foi introduzida no início do século XX, derivada do termo tcheco “robota”, que significa “trabalho”. Joseph Capek cunhou este termo em sua peça “Rossum’s Universal Robots” em 1921. No entanto, com o tempo, o termo passou a ser associado a tarefas repetitivas realizadas por máquinas (Morrell *et al.*, 2020).

No final da década de 1950, um engenheiro e inventor da empresa *Unimation* conseguiu desenvolver o primeiro braço robótico, que ficou conhecido como *Unimate*. Este braço robótico foi inspirado nos contos e histórias de ficção do autor Isaac Asimov (Valério; Garcia, 2014). Já no início da década de 1960, a empresa *Unimation* instalou o primeiro braço robótico industrial em uma das linhas de produção da General Motors (GM), conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1. Robô *Unimate* instalado na General Motors em 1961

Fonte: IEEE (2020)

Nas últimas décadas, a robótica tem sido cada vez mais utilizada em cirurgias. Nos anos recentes, essa tendência se intensificou com o avanço das tecnologias e os resultados obtidos, especialmente em procedimentos minimamente invasivos. A robótica tem demonstrado benefícios significativos, como melhor visualização, maior destreza e precisão aprimorada (Gomes, 2021).

Segundo Gross (2020), a evolução da robótica ao longo das décadas tem sido marcada por avanços significativos, desde suas aplicações iniciais na indústria até sua incursão em setores como a medicina. No panorama industrial, o surgimento do robô *Unimate* na década de 60, instalado em uma linha de montagem da GM, representou um marco histórico.

Posteriormente, na década de 70, no Japão, testemunhamos o desenvolvimento do primeiro robô inteligente automático, cujo foco na visão e na montagem de objetos por meio de projetos específicos abriu caminho para novas possibilidades (Valério, Garcia, 2014).

Um estudo emblemático, o “*Roadmap for US Robotics*”, conduzido em 2009, lançou

luz sobre a trajetória dos últimos 50 anos, ressaltando o papel dos robôs na conferência de precisão às operações e no aumento do rendimento, sobretudo em atividades repetitivas e em ambientes de trabalho de alto volume e/ou perigosos (Rocha *et al.*, 2022).

À medida que a robótica evoluiu, sua influência transcendeu os limites da indústria e se expandiu para o campo médico. Mendes (2018) destaca esse fenômeno, observando que desde o início do século XX, os avanços na robótica têm se estendido para diversos setores, incluindo a medicina. Especificamente, na área cirúrgica, a robótica emergiu como uma ferramenta promissora para aprimorar procedimentos minimamente invasivos.

Morrel *et al.* (2021) corroboram essa visão, descrevendo a cirurgia robótica como uma técnica ainda emergente, porém empolgante, que visa superar limitações nos procedimentos cirúrgicos convencionais. Os benefícios são notáveis: melhoria da ergonomia, visão tridimensional estereoscópica, instrumentos articulados e maior amplitude de movimento.

Os robôs cirúrgicos, controlados por computadores e programados para auxiliar na manipulação de instrumentos durante procedimentos cirúrgicos, têm sido especialmente úteis na laparoscopia, possibilitando cirurgias minimamente invasivas com maior precisão (Rocha *et al.*, 2022).

Os primeiros registros de uso da robótica em cirurgias médicas remontam a 1970, com projetos de cunho militar. Durante as décadas seguintes, surgiram sistemas notáveis como o Sistema Cirúrgico Da Vinci e o Sistema Zeus. O Sistema Zeus, desenvolvido pela Computer Motion em 1997, foi um marco ao ser o primeiro robô utilizado em cirurgias ginecológicas (Mendes, 2018).

O Sistema Da Vinci, desenvolvido pela Intuitive Surgical, apresenta um sistema de visão tridimensional que reproduz os movimentos e a destreza do cirurgião com alta fidelidade. Seus braços articulados oferecem uma ampla gama de movimentos, garantindo precisão e flexibilidade durante os procedimentos (Mendes, 2018).

Ambos os sistemas, Zeus e Da Vinci, representam o ápice da tecnologia na cirurgia robótica. Com múltiplos braços robóticos e uma variedade de instrumentos especializados, eles proporcionam aos cirurgiões um ambiente altamente controlado e preciso, resultando em melhores resultados para os pacientes. Sua capacidade de realizar movimentos complexos com facilidade e segurança eleva o patamar da prática cirúrgica moderna (Rocha *et al.*, 2022).

Segundo Winata (2018), o sistema Zeus é composto por dois braços robóticos destinados ao uso de instrumentos cirúrgicos e um braço robótico dedicado a um dispositivo de laparoscopia. Este sistema pode utilizar uma conexão de rede de alta velocidade (ATM), permitindo que os procedimentos cirúrgicos sejam realizados com segurança de maneira remota. A Figura 2 ilustra o sistema.



Figura 2. Robô Unimate instalado na General Motors em 1961

Fonte: Winata (2018).

Na Figura 2, são apresentados o robô e o console do Sistema Zeus. Por outro lado, o Sistema Da Vinci, desenvolvido pela *Intuitive Surgical*, é equipado com um sistema de visão tridimensional. Este sistema é capaz de replicar com alta precisão e flexibilidade os movimentos do cirurgião, permitindo que os instrumentos possam rotacionar 360° (Mendes, 2018).

As cirurgias assistidas por robôs têm se difundido rapidamente, superando algumas das limitações da laparoscopia. As notáveis vantagens da cirurgia robótica incluem alta definição, melhor ergonomia, visão estereoscópica 3D, possibilidade de ampliação da imagem, maior amplitude de movimento e uso de escala (Morrel et al., 2021).

Segundo Morrel et al. (2021), a tecnologia robótica cirúrgica tem superado diversas limitações inerentes à laparoscopia, especialmente no contexto da restauração da integridade da parede abdominal. A cirurgia robótica oferece vantagens significativas, como visão tridimensional e estável, múltiplos graus de liberdade, melhor ergonomia, além de permitir a realização de suturas e dissecções em ângulos desafiadores.

O Sistema Da Vinci foi concebido para que o cirurgião possa operar sentado no console de operação, controlando os braços robóticos. Um desses braços é equipado com uma câmera dotada de lentes que geram imagens estereoscópicas tridimensionais. Os braços robóticos possuem entre três e quatro articulações, proporcionando liberdade de rotação. A Figura 3, sistema Da Vinci (Mendes, 2018).



Figura 3. Sistema Da Vinci

Fonte: Adaptado Mendes (2018).

As cirurgias assistidas por robôs estão rapidamente se tornando preferência, superando algumas limitações da laparoscopia. Entre as vantagens significativas da cirurgia robótica estão a alta definição, ergonomia aprimorada, visão estereoscópica 3D, ampliação da imagem, maior amplitude de movimento e uso de escala (Rocha *et al.*, 2022).

2.2.1 Principais Características do Sistema Robótico

Madureira *et al.* (2017) descrevem o sistema robótico Da Vinci, que está conectado a um console de controle, onde o cirurgião manipula os instrumentos por meio de um joystick. Este console possui um monitor de vídeo tridimensional imersivo, assento e controles acionados pelos pés e mãos do cirurgião. Os braços robóticos, equipados com uma variedade de instrumentos, reproduzem com precisão os movimentos das mãos, dedos e punhos do cirurgião, reduzindo o tremor natural das mãos.

Comparativamente à laparoscopia convencional, a cirurgia robótica incorpora e supera as características positivas das técnicas minimamente invasivas. Oferece maior ergonomia, controle aprimorado, resolução de imagem superior, liberdade de movimento dos instrumentos, redução de tremores e a capacidade de ações remotas, diminuindo os riscos para o cirurgião, como exposição à radiação. Além disso, proporciona mais autonomia, exigindo menos assistentes e oferecendo maior precisão (Madureira *et al.*, 2017).

Rocha *et al.*, (2022) observam que tanto a laparoscopia convencional quanto a cirurgia robótica compartilham vantagens semelhantes em relação à laparotomia, como a redução de complicações, recuperação mais rápida e melhores resultados estéticos. No entanto, a cirurgia robótica apresenta vantagens adicionais, como uma visualização superior com visão panorâmica 3D e maior estabilidade, precisão e ergonomia.

A relação custo-benefício também é favorável ao uso de robôs cirúrgicos, contribuindo para a redução do tempo de cirurgia, aumento da eficiência e diminuição dos custos operacionais. Além disso, minimiza movimentos involuntários da câmera e a necessidade de limpeza da lente, resultando em economia para as instituições médicas (Amaral, 2021).

Gross (2020) destaca as várias vantagens da cirurgia robótica em relação à laparoscopia convencional e à cirurgia aberta, incluindo excelente coordenação entre mãos e visão do cirurgião, estabilidade da câmera, visão 3D e maior liberdade de movimento dos instrumentos. Em suma, a robótica cirúrgica, exemplificada pelo sistema Da Vinci, está redefinindo os padrões de precisão, controle e eficiência na prática médica, abrindo novos horizontes para procedimentos minimamente invasivos e melhorando significativamente os resultados para os pacientes.

A cirurgia robótica emerge como uma inovação revolucionária no campo médico, oferecendo uma série de vantagens significativas em comparação com as técnicas cirúrgicas convencionais. A precisão aprimorada e a destreza na operação dos instrumentos são aspectos notáveis que elevam a eficácia dos procedimentos. Além disso, a curva de aprendizagem relativamente pequena torna a adoção dessa tecnologia mais acessível aos profissionais de saúde (Gross, 2020).

Um dos pontos cruciais é a capacidade de integração com sistemas robóticos, permitindo a realização de simulações prévias às cirurgias, o que não só proporciona um treinamento avançado aos cirurgiões, mas também auxilia no planejamento detalhado das intervenções. Essas simulações, inclusive com o acompanhamento de um orientador, contribuem significativamente para o nivelamento das habilidades dos profissionais, garantindo um padrão elevado de qualidade nos procedimentos (Gross, 2020).



As vantagens da cirurgia robótica são destacadas em diversas áreas específicas, como na cirurgia hepatobiliar, onde os avanços tecnológicos superam as limitações da laparoscopia. O uso do robô cirúrgico não apenas prepara os profissionais para lidar com complexidades cirúrgicas, mas também minimiza a perda de sangue durante os procedimentos, resultando em intervenções mais seguras e eficazes (Amaral, 2021).

De acordo com Pitassi (2016), em cirurgias microvasculares e procedimentos de microcirurgia plástica ou reconstrutiva, a precisão da tecnologia robótica desempenha um papel crucial. Sua capacidade de atuar em espaços confinados, como artérias faciais, facilita os procedimentos e reduz a necessidade de incisões adicionais, promovendo uma recuperação mais rápida e menos traumática para os pacientes.

Além disso, o sistema de filtragem incorporado aos robôs cirúrgicos é altamente eficiente na redução dos tremores naturais das mãos dos cirurgiões, proporcionando uma sensibilidade visual e precisão superiores, o que resulta em cirurgias mais seguras e com menor incidência de complicações pós-operatórias (Pitassi, 2016).

De acordo com Pitassi (2016), outro aspecto relevante é a capacidade dos robôs cirúrgicos de realizar procedimentos remotamente, fornecendo uma visualização tridimensional de alta definição em tempo real. Isso não apenas permite uma compreensão mais detalhada da anatomia do paciente, mas também oferece uma precisão excepcional ao traduzir os movimentos das mãos do cirurgião para os instrumentos robóticos.

Em suma, a cirurgia robótica representa um avanço significativo na prática cirúrgica, proporcionando não apenas procedimentos mais precisos e eficazes, mas também uma recuperação mais rápida e menos traumática para os pacientes. Seus benefícios abrangentes abrem novas possibilidades no campo da medicina, promovendo um padrão mais elevado de cuidados de saúde (Amaral, 2021).

2.2.2 Principais Características do Sistema Robótico Cirúrgico da Vinci

O sistema robótico cirúrgico da Vinci destaca-se como uma das tecnologias mais avançadas e amplamente utilizadas em cirurgias minimamente invasivas. Esse sistema oferece uma visualização tridimensional de alta definição do campo cirúrgico, com ampliação de até dez vezes, permitindo que os cirurgiões identifiquem estruturas anatômicas com precisão (Madureira *et al.*, 2017).

Os braços robóticos do sistema seguem e manipulam os instrumentos cirúrgicos com estabilidade e precisão superiores, replicando os movimentos das mãos do cirurgião com uma amplitude maior e uma escala reduzida de tremores. Além disso, o cirurgião opera a partir de uma consola ergonômica, onde controla os braços robóticos e visualiza o campo cirúrgico, utilizando controles manuais e pedais que facilitam a manipulação intuitiva dos instrumentos (Matos, 2017).

As portas de acesso do sistema da Vinci requerem apenas pequenas incisões, resultando em menos dor pós-operatória, menor risco de infecção e uma recuperação mais rápida para os pacientes. A tecnologia do sistema filtra os tremores naturais das mãos do cirurgião, garantindo movimentos suaves e precisos durante a cirurgia (Silva *et al.*, 2022).

Conforme Silva *et al.* (2022), os instrumentos robóticos possuem uma amplitude de movimento superior às mãos humanas, permitindo que os cirurgiões alcancem áreas difíceis e realizem movimentos complexos com facilidade. Além disso, o sistema integra imagens de ressonância magnética e tomografia computadorizada em tempo real, fornecendo orientação precisa durante procedimentos complexos.

Conforme Gross (2020), com várias camadas de segurança e redundância, incluindo verificações automáticas e sistemas de backup, o sistema da Vinci assegura a segurança do paciente durante a cirurgia. Os cirurgiões que utilizam essa tecnologia passam por treinamento rigoroso e programas de certificação para garantir sua aptidão em operar o sistema de maneira segura e eficaz.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste estudo indicam que a aplicação da robótica em cirurgias médicas proporcionou avanços significativos para a prática clínica, especialmente em relação à precisão e segurança dos procedimentos. A análise do sistema Da Vinci destacou os benefícios da automação na medicina, permitindo intervenções menos invasivas e maior eficiência no processo de recuperação dos pacientes. Entretanto, desafios como os altos custos e a capacitação técnica de profissionais ainda se mostram presentes.

Em relação aos objetivos propostos, a pesquisa demonstrou o impacto positivo das tecnologias robóticas na medicina, mas também identificou limitações, como o acesso restrito a essas tecnologias em algumas regiões e as barreiras financeiras para hospitais de pequeno porte. Esses fatores restringem a aplicação em larga escala da robótica cirúrgica, evidenciando a necessidade de novos estudos que busquem soluções mais acessíveis.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar alternativas que possibilitem a redução de custos na implementação de robôs cirúrgicos, além de desenvolver sistemas robóticos mais acessíveis. Sugere-se, também, explorar novas tecnologias emergentes que possam complementar ou substituir os sistemas atuais, ampliando o acesso a procedimentos cirúrgicos avançados em uma escala global e promovendo maior equidade no setor da saúde.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Ana Angélica Paiva de Oliveira et al. **Abordagem cirúrgica robótica em câncer de pulmão: Revisão integrativa da literatura**. Research, Society and Development, v. 10, n. 13, p. e49101320964-e49101320964, 2021.
- GROSS, Jefferson Luiz. **Perspectivas da cirurgia robótica na área das doenças torácicas no Brasil**. In Jornal Brasileiro de Pneumologia, v. 46, 2020.
- IEEE, Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos. **Unimate**. 2020. Disponível em: <https://robots.ieee.org/robots/unimate/>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- Luis Alfredo Vieira; DUARTE, Alexandre Miranda; VAZ, Otávio Pires; RAMOS, José Reinan. **Modelo de programa de treinamento em cirurgia robótica e resultados iniciais**. In Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgias, v. 44, p. 302-307, 2017.
- MADUREIRA, Fernando Athayde Veloso; VARELA, José Luís Souza; D'ALMEIDA,
- MATOS, Hugo Alexandre Alves de. **Cirurgia Robótica em ORL: Uma abordagem ao sistema Da Vinci**. Clínica Universitária de Otorrinolaringologia. Faculdade de Medicina Lisboa. Universidade de Lisboa. 2017.
- MENDES, Carolina Joana de Lourenço Roriz. **Cirurgia Robótica em Ginecologia – Que Futuro? Ciências da Saúde**. Universidade da Beira Interior. Covilhã. Portugal. 2018.
- MORRELL, A. L. G. et al. **Aspectos técnicos essenciais em cirurgia robótica colorretal: Dominando as plataformas Da Vinci Si e Xi**. Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgias, v. 48, 2021.
- PITASSI, Claudio et al. **A cirurgia robótica nas organizações públicas de saúde: O caso do instituto nacional do câncer (inca)**. Administração Pública e Gestão Social, v. 8, n. 3, p. 187-197, 2016.

ROCHA, Karinne Nancy Sena. *et al.* **Atualizações científicas sobre a cirurgia robótica:** Manejo e dificuldades. In Brazilian Journal of Health Review, Curitiba, v.5, n.1, p.1276-1291 jan./feb. 2022.

Engenharia da Produção





IMPORTÂNCIA DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO NA GESTÃO SUSTENTÁVEL NAS INDÚSTRIAS: UMA REVISÃO DE LITERATURA

IMPORTANCE OF PRODUCTION ENGINEERING IN SUSTAINABLE
MANAGEMENT IN INDUSTRIES: A LITERATURE REVIEW

Gustavo Rafael Abreu Pereira

9

Resumo

A sustentabilidade é um tema frequentemente debatido na engenharia de produção e está ganhando cada vez mais relevância devido ao crescimento da ênfase no desempenho sustentável nas organizações. No entanto, questão do desenvolvimento sustentável precisa ser profundamente e consistentemente integrada ao processo de administração estratégica das empresas. Trata-se de uma pesquisa qualitativa e descritiva, tendo como objetivo geral a importância da engenharia de produção na gestão industrial sustentável. Concluiu-se que a questão da sustentabilidade está cada vez mais presente nas empresas, com a sustentabilidade sendo percebida pelas companhias como uma decisão estratégica, nesse âmbito, a Engenharia de Produção se tornou uma importante parceira na administração de uma empresa, com o desenvolvimento de ferramentas eficazes tecnicamente, capazes de reduzir os efeitos negativos causados pela reestruturação de uma empresa e um processo, buscando satisfazer as demandas da sociedade de forma ética e pontual. Portanto, o tema discutido neste estudo é de grande importância e relevância para a comunidade acadêmica, uma vez que fornecerá apoio para pesquisas e interesses relacionados aos assuntos presentes na literatura especializada.

Palavras-chave: Engenharia de produção, Indústria, Gestão Sustentável.

Abstract

Sustainability is a frequently debated topic in production engineering and is gaining more and more relevance due to the growing emphasis on sustainable performance in organizations. However, the issue of sustainable development needs to be deeply and consistently integrated into the strategic management process of companies. This is a qualitative and descriptive research, with the general objective of the importance of production engineering in sustainable industrial management. It was concluded that the issue of sustainability is increasingly present in companies, with sustainability being perceived by companies as a strategic decision, in this context, Production Engineering has become an important partner in the management of a company, with the development of technically effective tools, capable of reducing the negative effects caused by the restructuring of a company and a process, seeking to satisfy the demands of society in an ethical and punctual manner. Therefore, the topic discussed in this study is of great importance and relevance to the academic community, since it will provide support for research and interests related to the issues present in the specialized literature.

Keywords: Production Engineering, Industry, Sustainable Management.

1. INTRODUÇÃO

Incorporar a sustentabilidade na administração organizacional, particularmente nas indústrias, é reconhecido como um desafio significativo nos dias de hoje. Não importa o porte ou alcance de uma empresa, a questão da sustentabilidade merece especial atenção dos gestores. O conceito de sustentabilidade diz respeito à habilidade humana de interagir com o mundo de forma a preservar as necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações, o que implica na busca por novas formas de gerir os recursos disponíveis.

As empresas desse ramo devem buscar a sustentabilidade através de uma gestão mais eficiente, visando a redução de desperdícios, aprimoramento da segurança no ambiente de trabalho e a minimização do impacto ambiental, dentre outros aspectos. Com isso, a gestão sustentável deve ser incorporada e posta em prática. Neste contexto, o estudo tem como propósito identificar os principais pontos de debate sobre sustentabilidade e sua aplicação na gestão focada na engenharia civil.

A análise realizada revela que esse assunto ainda gera controvérsias e é alvo de debates, devido às incertezas existentes e à falta de consenso na indústria quanto ao seu real significado. Embora os profissionais mostrem algum entendimento sobre sustentabilidade, ainda encontram dificuldades em implementar estruturas que incorporem efetivamente os aspectos ambientais, sociais e econômicos necessários para promover a sustentabilidade. Dessa forma, a temática abordada neste estudo se mostra de extrema relevância para a comunidade acadêmica, pois oferecerá suporte para pesquisas e interesses relacionados ao tema presentes na literatura especializada.

A sustentabilidade no ambiente industrial envolve a interconexão de todas as áreas da empresa, abrangendo processos, métricas, controles, operações intermediárias e demais ferramentas de gestão que assegurem a sustentabilidade em sintonia com os princípios ambientais.

Reconhecemos que os engenheiros de produção recebem formação específica para unir conceitos de matemática e administração, visando atender às demandas da sociedade, impulsionar aprimoramentos nos sistemas de produção e avaliar questões ligadas ao meio ambiente. Pensando nesta perspectiva, este estudo foi desenvolvido a partir da questão de pesquisa: “De que forma a Engenharia de Produção pode contribuir para a gestão sustentável nas indústrias?”

No que tange aos objetivos desta pesquisa, temos como objetivo geral: Realizar um estudo específico sobre a importância da engenharia de produção na gestão sustentável nas indústrias. Os objetivos específicos são: apresentar a importância da sustentabilidade dentro das indústrias; discutir sobre os impactos ambientais que a falta de sustentabilidade nas indústrias pode causar; apontar métodos e estratégias que possam colaborar com a redução de desperdícios, segurança do ambiente de trabalho e redução do impacto ambiental.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Para a realização do presente trabalho serão realizadas pesquisas bibliográficas por se tratar de uma pesquisa qualitativa e descritiva, desta forma, não é exploratória, não é expe-

rimental, não é estudo de caso, não utiliza hipóteses e não permite a proposição de nenhuma intervenção. As pesquisas serão especificamente sobre a importância da engenharia de produção na gestão industrial sustentável, estas serão feitas por meio de publicações e artigos científicos que foram publicados nos últimos 10 anos.

Sobre os critérios de inclusão, em um primeiro momento, foram selecionados os resumos das produções. Nesses, foram identificados o nome de periódico ou tese, título do artigo, autores, ano de publicação e o referencial metodológico. Foram considerados os trabalhos publicados de 2014 à 2024. No que tange aos critérios de exclusão, foram excluídas as produções que não condiziam com o objetivo do projeto, com ano anterior à 2014, artigos que não estavam disponíveis na íntegra, artigos que não estivessem em português e inglês e estudos duplicados. O acesso e busca das informações foram realizados na Scientific Electronic Library Online (SciELO) e Google acadêmico. Os descritores que estavam no projeto eram: “Engenharia sustentável”, “Gestão sustentável” e “Indústria”.

2.2 Resultados e Discussão

Segundo Fenker (2014), “a sustentabilidade é a capacidade de preservar um equilíbrio eterno e sistêmico que garanta a persistência da vida neste planeta.” Incorpora os elementos sociais, econômicos e ambientais de maneira unificada e inseparável. Logo, o oposto, isto é, quando não se consegue manter o equilíbrio da maneira prevista, pode ser classificado como insustentabilidade.

No Brasil, a situação da administração de recursos naturais e resíduos de produtos ainda é insatisfatória em diversos setores de produção. Na procura por uma administração eficaz e sustentável de recursos, a sociedade tem criado leis e conceitos de responsabilidade corporativa, visando harmonizar o desenvolvimento econômico com as questões ambientais. Por exemplo, o conceito de desenvolvimento sustentável, que visa o crescimento econômico com o mínimo de impactos ambientais, tem sido aplicado para satisfazer as demandas atuais, sem prejudicar as necessidades das futuras gerações (XAVIER; CORRÊA, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2012).

O tema do desenvolvimento sustentável deve ser profunda e firmemente incorporado ao processo de gestão estratégica das organizações. O conceito de desenvolvimento sustentável ganhou atenção pela primeira vez na década de 1980, quando o Relatório Brundtland foi publicado, embora a sua apresentação inicial fosse algo pouco clara e difícil de compreender. No entanto, a essência do desenvolvimento sustentável permanece inalterada, enfatizando a importância de considerar as gerações futuras ao implementar práticas que promovam a sustentabilidade. Ao fazer isso, garantimos que os recursos disponíveis hoje possam ser usufruídos também pelas gerações futuras (KRUGLIANSKAS; PINSKY, 2014).

Holden, Linnerud e Banister (2016) propuseram um modelo de desenvolvimento sustentável baseado em pilares éticos, como atender às necessidades humanas, garantir a equidade social e respeitar os limites ambientais. Este é um modelo diferente do antigo. Após a investigação, os mesmos autores concluíram que o desenvolvimento sustentável está diretamente relacionado com as políticas internas de cada país, e os constrangimentos, as necessidades e a equidade não são vistas da mesma perspectiva em todo o mundo. Políticas que dependem das prioridades de tomada de decisão de cada país.

Gestão refere-se a um conjunto de mentalidades destinadas a organizar, traçar estratégias, orientar, supervisionar e harmonizar os esforços de um grupo unido de indivíduos.



os com um objetivo comum. Para atingir esse objetivo, é necessário levar em consideração fatores relacionados ao negócio, ao meio ambiente e às interações internas (ARAÚJO; GARCIA, 2015).

A gestão ambiental é entendida como diretrizes e atividades operacionais e administrativas, como controle, alocação de recursos, planejamento, orientação etc., que visam reduzir ou eliminar as ações humanas (BARBIERI, 2017). Portanto, a gestão ambiental é uma prática importante para alcançar o equilíbrio entre os diferentes ecossistemas. Este equilíbrio é amplo, pois envolve múltiplas questões, incluindo questões naturais, sociais, culturais, políticas e econômicas. O uso sustentável e racional dos recursos naturais pode ser abordado como uma série de ações que abrangem diversos setores, sociedade e políticas públicas. Estas ações podem ser econômicas, científicas, administrativas, políticas, jurídicas e envolvem coordenação entre diferentes níveis. Dentro desta estrutura, a gestão ambiental tem várias funções-chave, incluindo planejamento, organização, gestão e controle.

O tema gestão de projetos e sua ligação com a sustentabilidade foi explorado por Morioka e Carvalho (2016). O objetivo foi analisar artigos que abordassem a intersecção entre gestão de projetos e sustentabilidade. Foi reunido um número significativo de artigos e houve um aumento notável no interesse a partir de 2014. Esses projetos priorizam mais do que apenas terminar a tarefa em questão; eles também enfatizam a importância de adotar uma perspectiva sustentável.

Para abraçar a sustentabilidade, as organizações devem considerar uma visão coletiva. Ao implementar um sistema simples de troca de materiais, as empresas podem envolver-se em práticas de reciclagem, aumentando assim os seus esforços de sustentabilidade, minimizando a sua pegada ambiental e conseguindo poupanças de custos, ao mesmo tempo que satisfazem as expectativas financeiras dos investidores (MISTURINI; NASCIMENTO, 2016).

Os três R's, ou seja, reduzir, reutilizar e reciclar, são características que devem ser incorporadas pela confluência de vários profissionais, especialmente pertencentes à responsabilidade da Engenharia de Produção. A escolha pelo desenvolvimento sustentável demanda uma visão compartilhada da organização como discurso. A própria troca de materiais implicando reciclagem permite o reaproveitamento, devolvendo a sustentabilidade do empreendimento e levando à diminuição do impacto ambiental. Também proporciona economia e atende aos objetivos dos investidores em relação às finanças (MISTURINI; NASCIMENTO, 2016).

Numerosas empresas abraçaram o conceito de produção mais limpa, também conhecida como P+L, reorganizando os seus processos de produção para dar prioridade a considerações ambientais e sociais. Um estudo realizado entre grandes corporações de São Paulo esclarece as vantagens e os desafios associados à implementação da demonstração de resultados (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Oliveira (2015) ressalta que embora os benefícios ambientais de uma tal abordagem sejam louváveis, ela tem um impacto nos aspectos econômicos. Uma medida de equilíbrio comumente examinada é o retorno do investimento para cada projeto, que desempenha um papel crucial na tomada de decisões estratégicas de uma organização.

De acordo com Kai *et al.* (2014), as organizações estão em constante transformação, e a mudança é vital para a sua sobrevivência. Eles enfatizam que a produção sustentável só pode ser alcançada quando uma série de critérios são atendidos para permitir que os sistemas de produção realizem a sustentabilidade. O que precisa acontecer é questionar o modelo de produção da empresa que foi estabelecido e trabalhar em direção a algo novo,

em termos do modelo conceitual. Para isso, é essencial desafiar o modelo de produção existente nas empresas e estabelecer novos modelos que abordem estrategicamente as preocupações sociais, econômicas e ambientais simultaneamente.

Chofreh e Goni (2017) conduziram um estudo para buscar as estruturas para implementar a sustentabilidade. A lacuna entre implementação e literatura pode ser vista na pesquisa que buscou auxiliar profissionais na adoção da sustentabilidade em suas empresas, e uma lacuna adicional pode ser quebrada para os praticantes. Também pode ser concluído que a conscientização sobre questões de sustentabilidade está crescendo em todo o mundo, onde o desenvolvimento sustentável está sendo incorporado às missões estratégicas das organizações.

No que diz respeito à contribuição da Engenharia para o crescimento sustentável, Loureiro, Pereira e Pacheco Junior (2014) realizaram uma pesquisa com o objetivo de investigar a abordagem educacional sobre Engenharia. Constatou-se que as instituições de ensino estão implementando disciplinas com o intuito de promover a conscientização sobre a sustentabilidade nesse campo, ou seja, a perspectiva socioambiental passou a ser parte integrante do currículo dos alunos. A expectativa é de que, com essa iniciativa, seja possível formar engenheiros engajados com a sustentabilidade.

Conforme Glavic (2017), a preocupação com a sustentabilidade e a produção mais limpa e o controle da poluição está aumentando, com um consumo sustentável e a eliminação de resíduos. O Engenheiro de Produção é o encarregado dessa produção ecológica, e seu maior desafio é ser produtivo de maneira positiva, estabelecer uma empresa bem-sucedida com ética, competitiva e adaptável ao mercado, sempre respeitando o meio ambiente ao seu redor.

Segundo Loureiro, Pereira e Pacheco Junior (2014), a sustentabilidade é construída através da interação de diversos processos. A educação promove uma consciência crítica e participativa, a ciência, as tecnologias e a inovação contribuem para a geração de novos saberes. A ética é crucial para guiar as pessoas a agir de maneira ética e adequada no meio ambiente.

Neste contexto, a sustentabilidade ambiental tem como base a proteção do meio ambiente, a manutenção do equilíbrio ecológico essencial para a existência humana, a fauna e a flora, e, em particular, o uso sustentável dos recursos naturais, a observância das leis, a redução dos efeitos ambientais, a gestão de resíduos líquidos e sólidos, tecnologias sustentáveis, reciclagem e a educação ambiental em vários segmentos da economia e na sociedade civil.

Em relação ao desenvolvimento sustentável, as organizações precisam levar em conta e prestar atenção aos elementos de uma estratégia equilibrada para atingir metas ambientais, sociais, econômicas e de longo prazo, que envolvem pessoas, o planeta e a lucratividade, constituindo os três pilares da sustentabilidade (GLAVIC, 2017), conforme ilustrado na Figura 1.



CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE	
PILAR AMBIENTAL	
	Desenvolvimento de uma interação de processos com o meio ambiente, sem causar danos ao mesmo
PILAR SOCIAL	
	Desenvolvimento de ações que busquem valorizar os trabalhadores, as empresas e a sociedade.
PILAR ECONÔMICO	
	Desenvolvimento de produtos e empreendimentos que atendam os fatores sociais e ambientais de maneira economicamente viável

Figura 1. Três Pilares da sustentabilidade

Fonte: Glavic (2017)

Para manter uma empresa ou até mesmo um país sustentável, é crucial aderir aos três pilares da sustentabilidade. A questão econômica é crucial para assegurar os lucros de uma empresa ou país específico. No entanto, não basta apenas lucrar, é preciso ter consciência, pois cada método de ganho gera consequências, que nem sempre são benéficas para a sociedade ou o meio ambiente (GLAVIC, 2017).

Loureiro, Pereira e Pacheco Junior (2014) ainda destacaram a relevância da Engenharia no avanço da sustentabilidade. Isso se dá pela inovação de produtos tecnológicos que têm impacto direto no meio ambiente. Nesse sentido, o papel do engenheiro é fundamental para o progresso sustentável. O estudo ressalta que, embora a questão da sustentabilidade esteja presente na formação do profissional, influências externas dificultam sua implementação. Dentre essas influências estão questões institucionais, culturais, econômicas e ambientais, o que torna a aplicação desse pensamento um desafio.

Jones, Michelfelder e Nair (2017) destacam a importância de incluir a sustentabilidade na Engenharia. No caso, estes profissionais são capazes de monitorar os efeitos a longo prazo de um projeto nas fases de engenharia. Após mais ou menos três décadas de discussão, ficou claro que engenheiros podem implementar a sustentabilidade em suas organizações; no entanto, ainda há muito estudo necessário para aproximar esses profissionais da cultura da sustentabilidade.

De acordo com Oliveira *et al.* (2015), os problemas econômicos são cruciais para a adesão à produção mais limpa. Parece que a mensuração econômica não é um problema no que diz respeito aos investimentos necessários para a implantação de projetos, e os empresários prestam grande atenção à sua análise quando fazem escolhas estratégicas. É mais difícil medir os benefícios ambientais e sociais positivos. Como medir os efeitos futuros no meio ambiente, por exemplo, ou calcular quanto em valor monetário essas melhorias melhoram a reputação da empresa na sociedade. Isso demonstra que os benefícios

sociais e ambientais em relação ao econômico precisam ser valorizados mais e que é difícil entendê-los no ambiente empresarial.

No cenário financeiro atual, tanto no país quanto no exterior, há uma procura por investidores por empresas com responsabilidade ambiental. Os aportes realizados nessas entidades são conhecidos como “investimentos socialmente responsáveis” (SRI). Isso indica que as empresas sustentáveis proporcionam um valor superior ao acionista a longo prazo, devido à sua maior preparação para o futuro e seus perigos (BOVESPA, 2015).

A Engenharia de Produção desempenha um papel direto na administração de uma empresa, aprimorando os processos e atendendo às novas demandas oriundas da globalização. A maioria dessas alterações são estruturais e econômicas. Portanto, a partir da revolução industrial, tornou-se um campo voltado para a administração da produção, que pode ser utilizado na administração de qualquer empresa (RUFINO, 2015).

3. CONCLUSÃO

Este estudo mostra que a Engenharia de Produção é um forte aliado na administração de uma empresa, podendo favorecer tanto os aspectos técnicos quanto os profissionais envolvidos no processo produtivo. Dessa forma, busca satisfazer todas as demandas da sociedade de maneira mais humanizada. Para garantir a eficiência da gestão ambiental é fundamental estabelecer uma base sólida, mesmo quando todas estas tarefas são executadas de forma harmoniosa. Esta gestão é responsável por acompanhar de perto o estado atual da empresa, através do exame dos dados financeiros constantes do balanço e da demonstração de resultados. Consequentemente, estes indicadores são de extrema importância para as empresas que operam num mercado cada vez mais acirrado, onde são imperativos ajustes rápidos à evolução das circunstâncias e a adoção de novas tecnologias.

Concluiu-se com esse estudo que a Engenharia de Produção desempenha um papel crucial na gestão sustentável nas indústrias ao integrar práticas que equilibram eficiência operacional, responsabilidade ambiental e impacto social positivo. Por meio de ferramentas e metodologias como análise de ciclo de vida, otimização de processos e uso de tecnologias limpas, os engenheiros de produção podem contribuir para reduzir desperdícios, melhorar a utilização de recursos e minimizar emissões e impactos ambientais.

Além disso, ao adotar uma abordagem sistêmica, a Engenharia de Produção facilita a implementação de estratégias sustentáveis que não apenas atendem às demandas de regulamentações ambientais, mas também criam valor competitivo para as empresas. Ao promover a economia circular, inovação e melhoria contínua, esse campo auxilia as indústrias a se adaptarem a um cenário global que exige práticas empresariais mais éticas e responsáveis. Assim, a Engenharia de Produção torna-se indispensável para alcançar uma gestão industrial que seja ao mesmo tempo lucrativa, eficiente e alinhada aos princípios da sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, L., C., G.; GARCIA, A., **A. Gestão de pessoas**. Edição Compacta, Editora Atlas, São Paulo, 2015.
- BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. 2ª edição. São Paulo: Saraiva, 2017.
- BOVESPA. Disponível em: www.bmfbovespa.com.br. Acesso em outubro de 2024



- CHOFREH, A.G.; GONI, F.A. **Review of Frameworks for Sustainability Implementation**. Sustainable Development, v.25, n. 3, p. 180-188, 2017
- FENKER, E. **Impacto ambiental e dano ambiental**. Disponível em: <https://www.academia.edu/> acesso em setembro de 2024
- GLAVIC, P. **Revisão dos termos de sustentabilidade e suas definições**. São Paulo: Atlas, 2017.1885 p
- HOLDEN, L.; LINNERNUD, K.; BANISTER, D. **The Imperatives of Sustainable Development**. Sustainable Development, v.25, n. 3, p. 213-226, 2016.
- JONES, S. A.; MICHELFELDER, D.; NAIR, I. Engineering managers and sustainable systems: the need for and challenges of using an ethical framework for transformative leadership. **Journal of Cleaner Production**v.140, n.1, p. 205-212, 2017
- KAI, D. A.; LIMA, E. P.; COSTA, S. E. G.; **Modelo Conceitual para Introdução das Práticas de Sustentabilidade nas Operações da Indústria Gráfica**. GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas. Bauru. Ano 9, n.4, p. 1-18, 2014.
- KRUGLIANSKAS, I.; PINSKY, V.C. **Gestão Estratégica da Sustentabilidade: Experiências Brasileiras**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- LOUREIRO, M. S.; PEREIRA, V. L. D. V.; PACHECO JUNIOR, W. **Novo Perfil de Formação para os Engenheiros por Meio da Incorporação das Competências para o Desenvolvimento Sustentável no Ensino da Engenharia**. Inter ciência. Caracas, Venezuela. v.39 n.11, p. 821-828, 2014.
- MISTURINI, D. D.; NASCIMENTO, C. A. Redução do Impacto Ambiental: Uma Abordagem no Setor de Modelagem em uma Empresa Calçadista. **Revista de Ciências da Administração**. Florianópolis S/C. v.18 n.46. p.120-136, 2016.
- MORIOKA, S. N.; CARVALHO, M. M. **Sustentabilidade e gestão de projetos: um estudo bibliométrico**. v.26, n.3. Production, São Paulo, 2016.
- OLIVEIRA, J. A.; GUARDIA, M.; QUEIROZ, G. A.; COBRA, R. L. R. B. Identificação dos Benefícios e Dificuldades da Produção mais Limpa em Empresas Industriais do Estado de São Paulo. **Revista Produção Online**. Florianópolis.v.15, n. 2, p. 458-481, 2015.
- OLIVEIRA, J. A.; GUARDIA, M.; QUEIROZ, G. A.; COBRA, R. L. R. B. Identificação dos Benefícios e Dificuldades da Produção mais Limpa em Empresas Industriais do Estado de São Paulo. **Revista Produção Online**. Florianópolis. v.15, n. 2, p. 458-481, 2015.
- RUFINO, Sandra. **(Re)fazer (Re) modelar, (Re)criar: a autogestão no processo produtivo**. São Paulo, 2015. Tese (Doutorado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

Resumo

Sendo a logística a dependência de qualquer cliente, o presente tema visa mostrar de forma abrangente como ocorre o processo logístico no Brasil e os problemas enfrentados nos modais de transporte brasileiro, ressaltando as consequências que o mesmo causa para os consumidores impactando algumas áreas. A estrutura da logística atual tem-se alguns gargalos que precisam ser enfrentados pra entregar com qualidade ao consumidor, e eles precisam ser trabalhados ao longo do processo, visto que é de extrema importância o cumprimento de prazos levando a eficácia e satisfação de quem adquirir. Nesse sentido o trabalho em questão propõe entender e explicar a logística brasileira e seus problemas, fazendo com que o leitor entenda os atrasos e inconsistências na entrega de um determinado serviço. Trata-se de um estudo descritivo, qualitativo, que foi realizado através de revisão bibliográfica em que as leituras dos autores abordados serviram como um suporte para a compreensão das ideias existentes. Os resultados concluem que, de fato a infraestrutura, falta de investimento e outros problemas, gera um impasse na logística atual, sendo um dos principais fatores a serem trabalhados, podendo ser realizado um plano de melhoria contínua.

Palavras- chave: Logística Brasileira. Logística Atual. Entregas. Qualidade.

Abstract

Since logistics is dependent on any customer, this topic aims to comprehensively show how the logistics process occurs in Brazil and the problems faced in Brazilian transportation modes, highlighting the consequences that it causes for consumers, impacting some areas. The current logistics structure has some bottlenecks that need to be addressed in order to deliver quality to the consumer, and these need to be worked on throughout the process, since meeting deadlines is extremely important, leading to efficiency and satisfaction for those who purchase. In this sense, the work in question proposes to understand and explain Brazilian logistics and its problems, making the reader understand the delays and inconsistencies in the delivery of a given service. This is a descriptive, qualitative study, which was carried out through a bibliographic review in which the readings of the authors approached served as a support for understanding the existing ideas. The results conclude that, in fact, infrastructure, lack of investment and other problems create an impasse in current logistics, being one of the main factors to be worked on, and a plan for continuous improvement can be carried out.

Keywords: Brazilian Logistics. Current Logistics. Deliveries. Quality.

1. INTRODUÇÃO

Entende-se por qualidade, aquilo que é adequado ao uso e satisfaça as necessidades de quem adquirir, seja ela produto ou serviço. Atualmente as empresas buscam cada dia mais a facilidade e menor custo ao oferecer o produto deixando de manter a qualidade como um todo. Analisando o cenário atual, todos os cidadãos são prestadores de serviço, pois aquele empregado no regime CLT oferece seus serviços a empresa, sendo ela oferecida a outro consumidor, e assim se tornando um ciclo no mercado, um dependendo do outro para melhor servir e ser algo positivo na economia do país.

Inicialmente, comprar algo se tornou muito mais fácil do que alguns tempos atrás, o produto por um momento é intangível e por alguns dias se torna tangível para o consumidor. A logística brasileira caracteriza-se como um setor de extrema importância para as organizações, isso se deu a busca disparada por e-commerce no ano da pandemia em 2020, foi então que o setor se expandiu afetando várias áreas do mercado.

Nesse contexto, entender como funciona o processo por trás da logística e quais as dificuldades enfrentadas para apresentar um serviço de qualidade, é interessante para ciência do consumidor, uma vez que ele se limita a compreender o processo da logística por trás do produto. Ao compreender essa importância, é possível expor soluções plausíveis.

É interessante dispor que, a satisfação do consumidor vem desde o primeiro contato com o produto, sendo ele a necessidade, atendimento, tempo de espera para chegar e por fim se o mesmo contém as características adequadas e esperadas. A falha em um dos processos pode afetar de forma negativa a empresa e todos envolvidos.

Percebe-se que os modais de transportes no Brasil enfrenta alguns desafios atualmente, como infraestrutura, falta de investimento, profissionais desqualificados, alta demanda nos pontos de distribuição, desorganização, falha de comunicação e tantos outros. Ficou explícito que a qualidade do produto/serviço está diretamente ligada a logística (faz parte do processo), enfatizando a logística brasileira, pois foi a que sofreu alguns impactos nos últimos anos.

O objetivo geral foi abordar sobre os problemas enfrentados nos modais de transportes atual no Brasil, bem como, as consequências que isso causa para o consumidor e desvaloriza o produto na etapa final. Quanto aos objetivos específicos, a pesquisa propõe – se mostra de forma clara e sucinta a cadeia da logística atual e seu processo diante de alguns impasses. Para construção do trabalho em questão, pretende-se responder a seguinte pergunta: Quais os gargalos devem ser trabalhados para melhorar a logística brasileira e entrega dos produtos? A escolha do tema se deu pela necessidade de explorar os indicadores que precisam ser trabalhados para melhor servir aqueles que compram por meios digitais.

2. METODOLOGIA

O tipo de pesquisa realizada neste trabalho, foi uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, no qual foi desenvolvida por meio de estudos das ideias de autores de livros, dissertações e por artigos científicos periódicos da internet, que abordam sobre os problemas na logística brasileira e como trabalhar etapas para melhorar o processo, chegando até o consumidor um produto/serviço de qualidade. A revisão necessita ter o objetivo de ganhar um sentido amplo mostrando a fundo como se dar todo o processo logístico no



estado brasileiro e o porquê de tantos desacordos ao coletar um material para seu destino, sendo assim, observando as variadas implicações que se agrupam buscando raízes diferentes resultando em uma problemática mais complexa.

Os documentos selecionados, foram de acordo com a base de dados da “Logística Território e Planejamento Territorial: A implantação das Plataformas Logísticas no Território Brasileiro e o Caso da PLMG em Anápolis/GO”, “A competitividade Logística no Brasil: Um Estudo com Base na estrutura existente”, “Google Acadêmico”, “Aplicação do QFD como uma Ferramenta da Qualidade no Setor de Serviços”. Os arquivos considerados para o desenvolvimento da pesquisa, são os trabalhos publicados nos últimos 13 anos, ou seja, entre os anos de 2010 a 2023. As palavras chaves utilizadas para a pesquisa foram: “logística brasileira”, “logística atual”, “modais de transporte”, “problemas logístico”, foram incluídas pesquisas em português com temas bem semelhante do abordado, excluindo aqueles sem nenhuma relevância para o trabalho apresentado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Logística é um termo de origem grega, que significa contabilidade e organização. Além disso, a palavra também tem raízes no francês “*logistique*”, referindo-se à arte de planejar e executar diversos projetos, sendo amplamente utilizada durante as guerras para coordenar o movimento de tropas, equipamentos e suprimentos.

Segundo o Conselho Internacional dos Profissionais de Logística e *Supply Chain* - CSCMP, a logística é definida como o processo de planejamento, implantação e controle do fluxo eficiente e eficaz de mercadorias, serviços e informações, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender às exigências dos clientes. Em outras palavras, a logística é responsável pela administração dos recursos materiais, financeiros e das informações relacionadas aos produtos comercializados. *Council of Supply Chain Management Professionals*. (2022). Todo o gerenciamento, desde a entrada de materiais, o planejamento da produção, até o armazenamento, transporte e distribuição dos produtos, é de responsabilidade da logística.

A logística, além de ser responsável por atender às necessidades de clientes e empresas, também agrega valor ao produto, pois os clientes valorizam a disponibilidade do produto no momento certo e no local adequado. Dessa forma, várias outras atividades são consideradas parte da logística, como transporte, localização, serviço ao cliente, previsão de demanda, movimentação de materiais, comunicação, compras e retorno de materiais (Costa; Dias; Gondinho, 2010).

A obtenção/suprimentos é fundamental para a logística, uma vez que por meio dessas atividades são tomadas as decisões de compras, o que pode influenciar diretamente nos custos logísticos (Faria; Costa, 2014). No entanto, essas atividades não devem ser confundidas com a função de compras, pois a obtenção/suprimentos apenas expõe as necessidades, enquanto a função de compras é responsável por negociar e avaliar os preços com os fornecedores.

A logística brasileira, teve início no ano de 1960, naquela época o mercado que atuava não era globalizado como atualmente, havia poucas empresas que não tinha tanta concorrência com a venda de produtos comparada com o hoje. Mas, com o avanço da tecnologia meios de comunicação acessível e principalmente o transporte, contribuíram para um grande avanço e mudar esse cenário. (Faria; Costa, 2019).

Atualmente, a competitividade entre empresas tem aumentado cada vez mais, sendo

caracterizada por diversos fatores, entre os quais se destacam a concorrência entre empresas do mesmo ramo de atuação, os custos logísticos e de estocagem de materiais, a elevada carga tributária, entre outros. Todos esses fatores, somados ao mau gerenciamento de recursos, limitam as ações das empresas, tornando-as não competitivas (Leite et al., 2015).

Para Mello (2018) atualmente a logística tem como foco diminuir o tempo de produção do produto até a entrega final ao cliente, é colocar as mercadorias e serviços no lugar certo, no tempo certo na condição desejada com o menor custo possível. O tempo requerido para um cliente receber um pedido depende do tempo necessário para entregar o pedido.

Ou seja, a logística atualmente tem como principal foco reduzir o tempo de produção do produto até sua entrega final ao cliente. O objetivo é garantir que mercadorias e serviços estejam no lugar certo, no momento certo, nas condições desejadas e com o menor custo possível. O tempo necessário para que um cliente receba um pedido depende diretamente da eficiência no processo de entrega.

3.1 Modais de transporte na logística

Na atual conjuntura, com a expansão de compras online, a logística se tornou ainda mais importante, porém, alguns problemas afetam de forma negativa o consumidor e a economia em si.

Segundo Christopher (2016), com várias opções de modais presentes, é possível verificar o empecilho que cada um enfrenta para prestar um serviço de qualidade para os compradores, sendo eles, a falta de infraestrutura; baixo investimento; alto valor de combustível; mão de obra desqualificada; falta de comunicação; falta de planejamento operacional e estratégico; frotas defasadas e tantos outros. Neste sentido, isso acaba gerando atrasos na entrega do produto, insatisfação nos consumidores e por fim, produtos de péssima qualidade.

No Brasil, os modais de transporte disponíveis incluem o aéreo, rodoviário, ferroviário, aquaviário e duto viário. A escolha do modal mais adequado depende de vários fatores, como o tipo de carga a ser transportada, o prazo de entrega necessário, a cobertura geográfica do serviço, a distância a ser percorrida e a infraestrutura da rota. Cada modal possui características específicas que o tornam mais apropriado para diferentes tipos de transporte, e a decisão sobre qual utilizar deve levar em consideração esses fatores para garantir a eficiência e eficácia do processo logístico. (Bowersox; Closs; Cooper, 2014).

O modal aéreo oferece a principal vantagem de um tempo de entrega significativamente reduzido, uma vez que as aeronaves podem atingir velocidades de até 900 km/h, no entanto essa rapidez vem com um custo elevado devido aos altos custos operacionais e de infraestrutura associados ao transporte aéreo (Mello, 2018). Por outro lado, o transporte rodoviário é o mais amplamente utilizado atualmente, proporcionando flexibilidade de horários e rapidez em comparação com outros modais. No entanto, devido à sua alta utilização, o transporte rodoviário está mais exposto a incidentes como acidentes e obras nas rodovias, que muitas vezes estão em condições precárias. Esses problemas podem resultar em atrasos nas entregas e custos adicionais com a manutenção dos veículos (Silva, 2020).

Os modais ferroviário, aquaviário e duto viário são mais indicados para o transporte de cargas de longa distância, perigosas ou de maior valor. Cada um desses modais tem características específicas que atendem efetivamente a certas necessidades da indústria, oferecendo soluções para diferentes tipos de carga e requisitos logísticos (Faria; Costa,



2014). Cada característica vista nos modais presentes, todas têm suas desvantagens e elas acabam que afetando o consumidor final, as mais comuns são mercadorias extraviadas, demora na entrega, roubo de cargas e ausência de comunicação com os interligados. Com o objetivo de demonstrar o que tem por trás da logística e suas fases principais, Fernandes (2012) mostra que ela é desenvolvida através de três fases, como esclarece a figura 1:

Figura 1. Estrutura e fases da operação



Fonte: Fernandes (2012)

Com base na Figura 1, a logística é composta por diversas atividades distintas que devem ser integradas para alcançar os objetivos organizacionais. Essas atividades incluem o armazenamento, transporte, gestão de inventário, distribuição, processamento de pedidos e retorno de produtos. A gestão integrada dessas funções é essencial para garantir a eficiência e eficácia dos processos logísticos.

Contudo, atualmente, a logística enfrenta vários desafios que comprometem seu desempenho e, conseqüentemente, a qualidade do produto. Problemas como falta de infraestrutura, baixo investimento, altos custos de combustível, mão de obra desqualificada, falta de planejamento e frotas defasadas têm impactado negativamente o sistema logístico. Esses desafios resultam em atrasos nas entregas, insatisfação dos consumidores e, em última instância, em produtos de qualidade inferior (Novaes, 2020).

Portanto, para que a logística atenda suas funções de forma eficaz, é crucial adotar uma gestão integrada e resolver os problemas existentes que afetam o desempenho logístico. A integração das atividades e a resolução dos desafios enfrentados permitirão à logística desempenhar seu papel de maneira eficiente, garantindo a entrega de produtos no tempo e local certos, e com a qualidade desejada.

3.2 Impactos nas áreas da logística

É importante deixar claro que, o consumidor apenas compra e em questão de minutos (se fosse possível) já queria seu produto em mãos, mas com os impasses da atual situação logística no Brasil, dificulta esse processo e realização de desejo. Temos em alta e explícita a problematização da fiscalização aduaneira, em que alguns pedidos ficam presos à espera da liberação da administração onde o produto fica retido, causando transtorno e custo para quem espera sua compra.

Essa fiscalização tem foco no mercado exterior, ou seja, em operações de importação e exportação e é realizada pela Receita Federal. Conforme Fleury (2017), o consumidor atual espera receber seu produto rapidamente, mas os desafios da logística no Brasil dificultam essa expectativa. Entre os principais obstáculos está a fiscalização aduaneira, que, ao focar em operações de importação e exportação, muitas vezes retém produtos, gerando transtornos e custos adicionais para quem espera pela liberação da Receita Federal.

Segundo Moraes (2015), a logística acaba tendo impacto em algumas áreas conforme quadro abaixo:

Quadro 1. Impactos nas áreas da logística

Marketing	Financeiro
Garante que o produto final será entregue na data, com qualidade e dentro do prazo acordado com o cliente, assim disponibilizando os produtos para venda e sempre tendo em mente a busca pelo menor custo fazendo com que a competitividade do mercado seja maior.	Interfere nas finanças no momento que a organização resolve comprar equipamentos, aumentar o número de frotas e a redução operacional, pois ela realiza um estudo para ver o que realmente será necessário.
Produção	Recursos Humanos
A logística garante a disponibilidade de produtos em geral que auxiliam na produção dos produtos diminuindo as interferências que possam ocasionar o fechamento da produção. Monitora as operações diminuindo os desperdícios.	Com o perfil traçado da empresa, o setor de recursos humanos consegue encontrar um perfil adequado e disponibilizar cursos para aperfeiçoar e capacitar os colaboradores do setor de logística

Fonte: Adaptado de Moraes (2015).

De acordo com Moraes (2015), todas as áreas mencionadas estão diretamente ou indiretamente interligadas com os processos diários da empresa. Elas auxiliam na tomada de decisões, com foco nos objetivos de curto e longo prazo da organização. Cada setor desempenha uma função que traz benefícios para a empresa como um todo. A logística, em particular, é responsável pelo controle de entregas, armazenamento, localização, capacidade de estoque e estruturação logística. Ela está conectada com outros setores, contribuindo para que a empresa alcance seus objetivos finais.

A logística desempenha um papel crucial na gestão e movimentação de produtos, afetando diretamente a eficiência e a eficácia dos processos empresariais. Aqui estão algumas maneiras pelas quais a logística interage com os produtos:

Armazenamento: A logística gerencia o armazenamento de produtos em depósitos e armazéns, garantindo que eles estejam disponíveis quando necessário e em condições apropriadas. O armazenamento eficiente ajuda a evitar a deterioração e perdas, além de otimizar o espaço e os recursos; **Transporte:** A logística organiza o transporte dos produtos desde os fornecedores até os clientes finais. Isso envolve escolher os modos de transporte mais adequados (terrestre, aéreo, marítimo), roteirizar as entregas, e coordenar com transportadoras e operadores logísticos; **Gestão de Inventário:** A logística monitora os níveis de estoque para garantir que haja um equilíbrio entre oferta e demanda. Isso inclui a gestão de inventário para evitar excesso ou falta de produtos, o que pode afetar tanto o custo quanto a satisfação do cliente; **Distribuição:** A logística é responsável pela distribuição eficiente dos produtos, coordenando a movimentação dos itens para os pontos de venda ou para o cliente final. Isso envolve planejamento da cadeia de suprimentos e otimização dos processos de distribuição; **Processamento de Pedidos:** A logística lida com o processamento de pedidos, desde a recepção até a expedição. Isso inclui a coordenação entre diferentes

departamentos para garantir que os pedidos sejam atendidos corretamente e no prazo; Retorno de Produtos: A logística também gerencia o retorno de produtos, lidando com devoluções e trocas. Isso envolve a logística reversa, onde os produtos são retornados para o estoque ou enviados para reciclagem ou descarte; Custos e Eficiência: A logística busca reduzir os custos associados ao armazenamento, transporte e manuseio de produtos, ao mesmo tempo em que aumenta a eficiência dos processos. Isso inclui a implementação de tecnologias e práticas que otimizem o fluxo de trabalho e reduzam desperdícios.

Para atingir esses objetivos, a logística integra diversas atividades, como planejamento da cadeia de suprimentos, gerenciamento de estoques, coordenação do transporte e otimização dos processos de distribuição. A capacidade de uma empresa em executar essas funções de forma eficaz não só melhora sua operação interna, mas também fortalece sua posição competitiva ao oferecer um serviço de alta qualidade e eficiente para seus clientes.

Portanto, de acordo com Ballou (2018), A logística desempenha um papel crucial na integração de atividades como o planejamento da cadeia de suprimentos, a gestão de estoques e a otimização de processos de distribuição. A eficácia dessas funções não apenas melhora as operações internas das empresas, mas também fortalece sua competitividade ao proporcionar serviços de alta qualidade e eficiência

3.3 Logística e sustentabilidade

Segundo Sousa (2019), a importância da sustentabilidade tem se tornado cada vez mais evidente na sociedade atual, tanto para o bem do meio ambiente quanto para a população. A sustentabilidade busca equilibrar as necessidades do meio ambiente com as da sociedade, promovendo uma melhor qualidade de vida.

Diante dos impactos que essa prática pode ter na população, começaram a surgir métodos sustentáveis que visam reutilizar os recursos naturais, evitando o esgotamento desses recursos e garantindo a continuidade da produção de bens. A ideia é assegurar que haja matéria-prima suficiente para a criação de produtos futuros, preservando os recursos naturais para gerações posteriores. Para Dias (2020), a sustentabilidade é um conceito fundamental que se refere ao uso responsável dos recursos naturais e à adoção de práticas que garantam o equilíbrio entre as necessidades atuais e futuras das pessoas e do meio ambiente. Ela é orientada por três pilares principais:

Sustentabilidade Ambiental: Este pilar enfatiza a conservação e o uso responsável dos recursos naturais para minimizar o impacto ambiental. Inclui práticas como a redução da poluição, a conservação da biodiversidade, o uso eficiente da água e da energia, e a promoção de energias renováveis. O objetivo é preservar os ecossistemas e garantir que os recursos naturais estejam disponíveis para as futuras gerações; **Sustentabilidade Econômica:** Foca na criação de valor econômico de maneira que seja sustentável a longo prazo. Isso envolve práticas empresariais que não apenas busquem lucro, mas também considerem o impacto econômico de suas operações sobre a comunidade e o ambiente. A sustentabilidade econômica promove a eficiência operacional, a inovação e a responsabilidade financeira, garantindo que os recursos sejam geridos de forma a suportar o crescimento e a estabilidade econômica; **Sustentabilidade Social:** Refere-se à promoção de um ambiente social justo e equitativo. Isso inclui garantir condições de trabalho justas, promover a inclusão e a diversidade, e melhorar a qualidade de vida das comunidades. A sustentabilidade social busca criar um impacto positivo nas pessoas, assegurando que os benefícios do desenvolvimento econômico sejam amplamente distribuídos e que as comunidades sejam

fortalecidas.

A integração desses três pilares é essencial para o desenvolvimento sustentável, que visa atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades. Isso exige uma abordagem holística que leve em conta os impactos ambientais, econômicos e sociais das decisões e práticas atuais.

Neste sentido, os recursos naturais eram considerados abundantes a ponto de muitos acreditarem que nunca se esgotariam. No entanto, com o tempo, e devido ao uso inadequado e excessivo desses recursos, foi constatado que a escassez poderia ocorrer a qualquer momento. Isso se deve ao fato de que, enquanto os recursos estavam sendo utilizados de maneira intensiva, não estavam sendo devolvidos ao meio ambiente de forma que permitisse sua reabastecimento e reutilização. Esse reconhecimento levou a uma crescente preocupação com a necessidade de práticas sustentáveis que garantam a preservação e a renovação dos recursos naturais para evitar o esgotamento e garantir sua disponibilidade para o futuro.

De acordo com Boff (2016, p.45), “Para ser sustentável o desenvolvimento deve ser economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto.” Esta definição ressalta a necessidade de um desenvolvimento que não apenas busca a viabilidade econômica, mas também se compromete com a justiça social e a responsabilidade ambiental, garantindo que as necessidades do presente sejam atendidas sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades.

4. CONCLUSÃO

Levando em conta todos os aspectos abordados no presente estudo, conclui-se que a importância da logística é confirmada, este trabalho mostra de forma detalhada as entranhas deste setor, com sua complexidade e como o mesmo merece e necessita de maior atenção no Brasil. Na atual situação brasileira com alto volume de produção e meios tecnológicos avançados, a logística no seu estado atual impacta de forma negativa e positiva na vida do consumidor mostrando através dos problemas que necessita – se de aplicações financeiras para se ter uma logística eficiente.

O Brasil possui condições de competir com seus produtos em muitos mercados ainda não explorado, apenas com a melhoria contínua da logística interna, para isso, investimentos em modais atuais poucos explorados se fazem necessário, como a ferrovia, a rodovia, hidrovía, aéreo e outros resultando em um processo de alto valor, porém, com qualidade adequada no serviço prestado satisfazendo o consumidor.

Nesse contexto, é notório que a logística no Brasil precisa enfrentar várias atividades para chegar no cliente final e para essas atividades serem bem desenvolvidas precisa - se ter melhor infraestrutura, tecnologia, mão de obra qualificada, pontos de distribuição, combustível de valor acessível e empresas com o objetivo de melhor servir aquele que compra.

Portanto, é de suma importância que seja realizado as tratativas de melhoria, ficando explícito que a logística no Brasil necessita investir no seu planejamento, principalmente nos modais de transporte para se ter uma entrega de qualidade no tempo e local certo, levando em consideração os objetivos da mesma, como também, chegar a níveis de competitividade iguais a outros países e atingir níveis de custos de logística nos mesmos padrões dessas nações é um desafio comparado ao cenário atual.



REFERÊNCIAS

- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: Transportes, administração de materiais e distribuição física**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2018.
- Blog Checklist. **Qualidade em serviços: entenda tudo o que você precisa**. Disponível em: <https://blog-pt.checklistfacil.com/qualidade-em-servicos/>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- BOFF, L. **Sustentabilidade: O que é – O que não é**. 5. ed. Petrópolis: Vozes, 2016.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Atlas, 2014.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: Estratégia, planejamento e operação**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2016.
- COSTA, J. P.; DIAS, J. M.; GONDINHO, P. **Logística. Coimbra: Universidade de Coimbra**, 2010.
- COUNCIL OF SUPPLY CHAIN MANAGEMENT PROFESSIONALS. **Supply chain**
- DIAS, R. **Sustentabilidade: O que é, como se faz e por que é importante**. São Paulo: Atlas, 2020.
- FARIA, A. C. de; COSTA, M. F. G. da. **Gestão de custos logísticos**. São Paulo: Atlas, 2014.
- FARIA, A. C.; COSTA, R. M. **História da logística no Brasil: Evolução e desafios**. Rio de Janeiro: FGV, 2019.
- FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. **Logística empresarial: A perspectiva brasileira**. São Paulo: Atlas, 2017.
- FOLLONI, A. P. **Tributação sobre o comércio exterior**. 2005. Disponível em: http://www.biblioteca.pucpr.br/tede/tde_arquivos/1/TDE20080512T170936Z835/Publico/AndreDto.pdf. Acesso em: 12 abr. 2024.
- LEITE, C. C. L. et al. **A logística e a gestão da cadeia de suprimentos: Um estudo de caso de uma empresa da região do Sul de Minas Gerais**. In: XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2015, Rio de Janeiro: SEGet, 2015. Disponível em: <http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/9122276.pdf>. Acesso em: 2015.
- managementdefinitions and glossary** (2022). Disponível em: www.supplychainmanagement.org. Acesso em: 09 ago. 2024.
- MARINHO, M. S.; DA SILVA, F. P. M. **Um balanço parcial das questões tributárias aduaneiras no STF em 2020**. Disponível em: <https://www.conjur.com.br/2020-nov-23/opinioao-questoes-tributarias-aduaneiras-stf2020>. Acesso em: 3 maio 2024.
- MORAIS, R. R. de. **Logística empresarial**. Paraná: Inter Saberes, 2015. p. 20-22, 26-27.
- NOVAES, A. G. N. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição: Estratégia, operação e avaliação**. São Paulo: Campus, 2020.
- SILVA, M. S. **Transporte rodoviário e seus desafios**. São Paulo: DEF, 2020.
- Site Esales. **Qual é a atual situação da logística no Brasil? Descubra aqui**. Disponível em: <https://esales.com.br/qual-e-atual-situacao-da-logistica-no-brasil-descubra-aqui/>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- SOUSA, R. **Sustentabilidade**. Brasil Escola. Citação de referências e documentos eletrônicos. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/>. Acesso em: 3 set. 2024.
- Terra. **5 principais tendências para a logística no Brasil em 2024**. Disponível em: <https://www.terra.com.br/economia/5-principais-tendencias-para-a-logistica-no-brasil-em-2024,decf2aa9545ec08a93830007fec-4fdb24q8m6a01.html>. Acesso em: 22 fev. 2024.
- Único Logística. **Logística no Brasil: qual seu tamanho e influência no país?** Disponível em: <https://unicologistica.com.br/logistica-no-brasil-qual-seu-tamanho-e-influencia-no-pais/>. Acesso em: 20 fev. 2024.

Resumo

Presente nos mais diversos setores da organização, o planejamento visa elaborar estratégias e definir como elas podem ser alcançadas, fazendo com que a empresa reconheça sua situação atual e faça uma projeção de futuro. O planejamento age como um gps, e a SWOT é como o ponteiro que fará com que esse objetivo seja alcançado, tendo em vista que a análise SWOT contempla uma análise sistemática de perspectivas internas, externas de uma empresa, aplicando os desafios a partir de suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Nesse sentido, o trabalho em questão propõe uma pesquisa onde o tema busca explanar a importância da correta aplicação da Análise SWOT. Trata-se de um estudo descritivo, qualitativo, que foi realizado através de revisão bibliográfica. Conclui-se que a correta aplicação da Matriz FOFA no ambiente organizacional é de extrema importância, já que a partir dos dados apresentados é possível realizar um plano de ação de melhoria contínua.

Palavras-chave: Análise SWOT. Planejamento e Organização. Empresas.

Abstract

Present in the most diverse sectors of the organization, planning aims to develop strategies and define how they can be achieved, making the company recognize its current situation and make a projection for the future. Planning acts as a GPS, and SWOT is like the pointer that will make this objective be achieved, considering that the SWOT analysis involves a systematic analysis of a company's internal and external perspectives, applying the challenges based on its strengths, weaknesses, opportunities and threats. In this sense, the work in question proposes a research where the theme seeks to explain the importance of the correct application of the SWOT Analysis. It is a descriptive, qualitative study, which was carried out through a bibliographic review. It is concluded that the correct application of the SWOT Matrix in the organizational environment is extremely important, since based on the data presented it is possible to carry out an action plan for continuous improvement.

Keywords: SWOT Analysis. Planning and Organization. Companies.

1. INTRODUÇÃO

A Análise SWOT é um sistema de análise simples desenhado para localizar ou verificar a posição estratégica de uma determinada empresa em seu ramo de atividade. Pela sua simplicidade, pode ser utilizado para realizar qualquer tipo de programa ou análise de ambiente, desde a criação de um *website* até a gestão de empresas multinacionais.

A ferramenta é excelente para que se desenvolva ou compreenda uma situação, organização ou processo decisório em todos os níveis do negócio. A realização e execução de uma análise SWOT pode ser demasiadamente simples, entretanto, seus maiores indicadores estão da sua flexibilidade e experiente aplicação.

Estudar sobre análise SWOT na conjuntura do planejamento e operacionalização nas empresas, torna-se pertinente na contemporaneidade, tendo em vista que essa ferramenta desvela elementos necessários para identificar o mercado e/ou o negócio que a empresa está inserida. É importante explicitar que um planejamento, bem como a operacionalização são dimensões imprescindíveis para o sucesso do empreendimento e de suas estruturas financeiras, as metas e objetivos que desejam ser alcançados, compreendendo as especificidades do mercado externo e seus desdobramentos no cenário interno da empresa.

Assim, a pesquisa foi relevante, uma vez que ampliou as discussões acerca da importância na análise SWOT no contexto da empresa. Compreende-se que é através da construção do conhecimento e dos debates na seara acadêmica, que se torna possível incentivar leitores e pessoas no que tange a aplicação de ferramentas capazes de promover melhor organização e operacionalização nas empresas. Logo, a pesquisa se mostra pertinente.

Deste modo, o presente trabalho será importante, pois ampliará o arcabouço teórico do tema em questão, levantando informações e literaturas necessárias para a construção da pesquisa e ainda, subsidiará futuras pesquisas acadêmicas a respeito da temática.

Entendendo a importância de um planejamento eficiente no ramo empresarial, com a finalidade de proporcionar um processo de operacionalização eficiente, surge um questionamento pertinente à temática: Qual a relevância da análise de SWOT no planejamento e operacionalização nas empresas?

A fim de elucidar tal problemática, a pesquisa teve como objetivo geral: estudar os impactos na organização e operacionalização na utilização da análise SWOT nas empresas. Quanto aos objetivos específicos, a pesquisa propõe-se: conceituar organização e operacionalização; caracterizar o método de análise SWOT e; compreender os benefícios da análise SWOT no planejamento e operacionalização em empresas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O estudo seguiu os princípios de uma revisão bibliográfica. Através deste tipo de pesquisa, foi possível levantar a literatura necessária para a análise e compreensão da temática proposta. Nesse sentido, o presente estudo foi de cunho qualitativo, a fim de analisar de forma crítica e subjetiva a pesquisa em questão.

As buscas foram realizadas na base de dados da *Scientific Electronic Library Onli-*

ne – SCIELO, Google Acadêmico e em Revistas Eletrônica de Engenharia de Produção, documentos disponibilizados em sites institucionais, que possibilitaram a coleta de informações necessárias através de artigos e periódicos disponibilizados. Deste modo, foram selecionadas pesquisas publicadas entre 2015 e 2021 escritas no idioma português, com os seguintes descritores: “análise SWOT”, “empresas”; “planejamento e operacionalização”.

No tocante a coleta de dados, foi pertinente a leitura exploratória de todo o material utilizado e leitura seletiva, a fim de buscar informações mais específicas e particularizadas sobre a temática, além de analisar os registros de informações obtidos nos artigos selecionados, como por exemplo, os resultados e discussões encontrados. No que tange a interpretação e análise dos resultados, destaca-se que a pesquisa foi submetida a uma leitura analítica.

2.2 Resultados e Discussão

Considerando os moldes propostos pela metodologia deste estudo, a busca eletrônica retornou um total de 343 artigos a partir das palavras-chave descritas anteriormente. Após a seleção dos estudos através da leitura dos títulos e resumos, foram descartados aqueles que não se encaixavam nas propostas desta revisão (n=323). Dentre estes, foram selecionados apenas 20 artigos que foram lidos na íntegra e incluídos no presente artigo.

A partir da literatura elencada para esta pesquisa, percebe-se que todos os planos começam com uma ideia, o que só é possível porque os seres humanos têm imaginação. A imaginação é responsável pelo pensamento. Dependendo do propósito que você estabelecer, ela pode se tornar muito poderosa e eficiente. Neste raciocínio inicial, percebe-se um plano de estrutura de planejamento simples, ou seja, imaginação, e depois pensamentos, conceitos, objetivos e metas (PÔNCIO, 2016). Seguindo esta linha de raciocínio, o conceito de planejamento parte primeiro do pensamento abstrato e depois segue por métodos mais concretos e palpáveis.

O planejamento dá resultado porque tem um conhecimento amplo do negócio. Organizações que não têm planejamento são aquelas que abrem as portas pela manhã e apenas esperam acontecer. Uma empresa com planejamento e criatividade é uma empresa que pode ser pesquisada a qualquer momento. Porém, não basta ter só planejamento, é preciso saber executá-lo. Outro ponto é reconhecer que a organização possui diversos tipos de planos, que são importantes em seus respectivos ramos. O fato é que todos devem estar integrados para atender às necessidades do negócio (CHIAVENATO, 2013).

Destarte, o planejamento compõe os aspectos de gestão empresarial, uma vez que se torna uma ferramenta pertinente para o desenvolvimento eficiente e seguro de um negócio. Considera-se que o planejamento faz parte de uma dinâmica estrutural e organizacional de uma empresa, pois determina as diretrizes e processos estratégicos, a fim de buscar o alcance de objetivos e metas no ambiente institucional (OLIVEIRA, 2020).

Por ser uma ciência, o planejamento também possui um número infinito de conceitos. Segundo Moreira, Perrotti e Duner (2015, p.328), planejamento é igual ao

“ato ou efeito de planejar, elaborar por etapas, como bases técnicas; planificações”. Conforme Corrêa (2021, p.98), é um “processo administrativo e sistemático para atingir um objetivo proposto”. Outro pensamento, segundo Pasquale (2022, p.98), o planejamento é como “processo de elaborar o plano, que é o documento escrito: portanto, planejamento é a ação, enquanto o plano é o resultado”, ou seja, considerando que cada autor diverge em alguns pontos sobre o conceito exato de planejamento, pode-se considerar a concordân-

cia deles de que ele é como a ideia ou expressão do pensamento em algo físico (MARTINS, 2017).

O planejamento inclui identificação, análise, estrutura, coordenação de tarefas, objetivos, metas, desafios, estratégias, políticas internas e externas, planos, projetos e atividades para alcançar o desenvolvimento mais eficiente e eficaz, tanto quanto possível focando em energia e recursos. Nesse sentido, contempla também as perspectivas de missão, visão e princípios de uma empresa, ou seja, alinha-se com as normas e não subsiste sem a presença da identificação empresarial. De acordo com Lopes (2017), não existe a possibilidade de planejamento, sem definir esses aspectos.

É nesta perspectiva que torna-se relevante a utilização da ferramenta SWOT.

De acordo com Hofrichter (2017) a sigla SWOT significa respectivamente: Forças, Fraquezas, Ameaças e Oportunidades, e a análise SWOT examina todos esses fatores para determinados projetos, negócios ou objetivos pessoais. A meta inicial é fixar um objetivo principal e, logo após, usar a Matriz para definir quais fatores externos e internos podem dificultar ou apoiar esse objetivo. As oportunidades e ameaças constituem os fatores externos que afetam a organização ou indivíduo, já as forças e fraquezas representam os fatores internos.

Para o referido autor, quando bem elaborada, uma SWOT auxilia na medição dos riscos e recompensas, simultaneamente, e identifica os principais fatores relacionados com a realização do objetivo, quanto mais precisa ela é, mais simples se torna criar um plano de ação geral para alcance das metas (HOFRICHTER, 2017). Segundo Oliveira (2019) Alguns dos principais objetivos da Análise SWOT são: a) efetuar síntese das forças internas e externas;

- a) identificar itens para organizar toda a gestão, isso implica no estabelecimento de prioridades para a atuação;
- b) preparar ações estratégicas: problemas e riscos que deverão ser resolvidos;
- c) a partir da SWOT conseguir o diagnóstico da empresa, indicações dos pontos a serem melhorados, fortalecer os pontos positivos, chances de crescimento visando a aumento de oportunidades etc;
- d) fazer previsões de vendas conforme as condições do mercado e capacidades gerais da empresa;
- e) ambiente interno (Forças e Fraquezas) – padronização e integração dos processos, eliminar as distrações e focar nas atividades principais;
- f) ambiente externo (ameaças e oportunidades) – confiança nos dados e decisão estratégica na redução de erros com apoio das informações e da gestão estratégica (OLIVEIRA, 2019).

Assim, a análise SOWT permite a empresa conhecer e identificar os processos pertinentes para a minimização de fatores que promovam riscos à gestão e produção, além de facilitar a apreensão de fatores estratégicos e técnicas operativas a fim de fortalecer a empresa em questão (OLIVEIRA, 2019).

O ambiente externo consiste em fatores que existem fora dos limites da organização e, de alguma forma, eles exercem influência sobre isso. Este é um ambiente no qual não há controle, mas deve ser continuamente monitorado, pois é uma base de planejamento estratégico (HOFRICHTER, 2017).

Ainda na esteira de pensamento de Hofrichter (2017) a análise do ambiente externo é



comumente dividida em fatores ambientais macro (políticos, demográficos, tecnológicos, econômicos etc.) e micro fatores ambientais (fornecedores, parceiros, consumidores etc.) que devem ser constantemente acompanhados, antes e depois da definição de estratégias da empresa.

Desta forma, através deste acompanhamento, será possível identificar prontamente as oportunidades e ameaças que surgem. Finalmente, se considerarmos que os fatores externos afetam todas as empresas que trabalham no mesmo mercado homogêneo, pode-se dizer que apenas aqueles que podem melhorar melhor as mudanças e ter agilidade para se adaptar é que eles poderão melhor aproveitar as oportunidades menor quantidade de danos e ameaças (HOFRICHTER, 2017).

O ambiente interno da empresa é feito de uma série de recursos humanos, financeiros e físicos, em particular, os que podem praticar mais controle, porque são o resultado de estratégias definidas na direção. Nesse ambiente, é possível determinar as forças que atendem aos recursos e funções que se transformam em uma vantagem competitiva para a empresa em relação aos seus concorrentes (OLIVEIRA, 2019).

Já as fraquezas, que são as deficiências apresentadas pela empresa em comparação com seus concorrentes atuais ou potenciais. Portanto, pontos fortes e fracos estão dentro dos limites de sua empresa, e é dentro desses limites que ocorre manipulação e o gerenciamento estratégico, com controle de cada fator (OLIVEIRA, 2019).

Nessa perspectiva, Fernandes (2021) pontua que é importante que as empresas determinem de forma técnica e estrutural, as dimensões externas e internas de seu processo organizacional e de planejamento, uma vez que esses aspectos da análise SOWT possibilitam reconhecer as limitações e o cenário que esta se encontra. Para tanto, torna-se necessário identificar os fatores que venham tanto contribuir quanto prejudicar a organização e estrutura da empresa.

De acordo com Hofrichter (2017), o processo apresenta informações e dados relevantes para alcançar as metas, mas nota-se que é apenas uma coleta de dados, a análise em si é apresentada pelos seguintes itens: a) pontos fortes: todos os atributos positivos, tantos os tangíveis quanto os intangíveis, internos dentro de uma organização e que estão sobre o controle da mesma; b) pontos fracos ou fraquezas: fatores que apesar de estarem sobre controle da organização, ainda sim ameaçam sua capacidade de atingir a meta.

Assim, o diagnóstico de fraqueza deve ser realizado a fim de detectar uma fragilidade na empresa que venha prejudicar a dinâmica da empresa e sua perspectiva organizacional. Em suma, as oportunidades são situações que ao serem aproveitadas de forma adequada e sistematizada, podem corroborar no bom desenvolvimento da empresa, em especial, no que se refere ao alcance de objetivos e metas (SOUSA, 2021).

As ameaças referem-se aos fatores negativos externos que estão fora do controle da organização e ameaçam colocar em risco toda a operação e gestão (HOFRICHTER, 2017). Assim, “pode envolver produto substituto, legislação rigorosa, competidor forte, mercado seletivo, alteração na legislação instabilidade institucional, macroeconomia fragilizada, integração da cadeia por parte de clientes e fornecedores, entre outros.” (JUNIOR, 2020, p. 63). Nesse sentido, as ameaças podem prejudicar o alcance de objetivo e o desenvolvimento empresarial.

Todos esses aspectos descritos em uma análise SOWT devem estar de acordo com a realidade do mercado e com o cenário social que a empresa se encontra, uma vez que este processo é imprescindível em detectar fatores internos e externos que afetam diretamente, seja de forma positiva ou organizativa, o processo organizacional de um negócio

(JUNIOR, 2020; SOUSA, 2021).

As principais utilidades dessa ferramenta são: permitir um estudo mais aprofundado das situações interna e dos aspectos externos que podem vir a ameaçar o crescimento da organização; possibilitar uma análise criteriosa da concorrência; indicar possíveis ações que deverão ser tomadas; a matriz FOFA ou análise SWOT é facilmente ser executada por empresas de grande, médio ou pequeno porte, dada a sua enorme praticidade e facilidade de aplicação, ou seja, tem o mesmo peso tanto uma Análise SWOT de um pequeno negócio como o de uma grande multinacional (LEITE; GASPAROTTO, 2018).

Deste modo, é uma ferramenta que tem a possibilidade de aplicação em todos os processos que envolvam a tomadas de decisão, além de caracterizar-se como uma importante esfera metodológica de estratégia, tendo em vista que todos os dados analisados e abordados são de grande valia para o processo administrativo de um negócio, onde são considerados perspectivas internas e externas pertinentes ao desenvolvimento e eficiência da instituição (CAMARGO, 2019).

Há várias maneiras de representar graficamente uma matriz FOFA, alguns delas são:

Figura 1. Representação matriz SWOT

	Internas		Negativas ou potencialmente negativas
	Pontos Fortes	Pontos Fracos	
	Oportunidades	Ameaças	
Positivas	Externas		

Fonte: Hofrichter (2017, p. 03)

A elaboração da matriz SWOT, possibilita facilitar em forma de tabela e/ou planilha a compreensão dos componentes de análise. Ao determinar os fatores internos e externos e seus aspectos, é necessário que a empresa busque relacionar com o ambiente que a empresa se propõe atuar e organizar esses fatores para melhor apreensão e entendimento dos dados (HORFRICHTER, 2017).

Na Figura 2, observa-se a representação da matriz SWOT em forma de planilha, objetivando abordar os elementos necessários para a organização da empresa:

Figura 2. Representação matriz SWOT

	Pontos Fortes	Pontos Fracos
Oportunidades	Ofensivo - fazer o melhor uso destes	Defensivo - examinar de perto os concorrentes
Ameaças	Ajustar - restaurar os pontos fortes	Sobreviver - dar a volta

Fonte: Hofrichter (2017, p. 04)

Assim, os pontos fortes e os pontos fracos tendem a mensurar a dinâmica da empresa, a partir das oportunidades e ameaças. A partir dessa análise, o administrativo perceberá a necessidade de oportunizar as situações, bem como perceber de forma crítica e analítica os concorrentes. Ainda, irá detectar as ameaças, a fim de minimizar riscos e conseguir contorná-los e/ou superá-los (HORFRICHTER, 2017).

A seguir, na Figura 3 uma representação da matriz de supervisão, considerando os aspectos construtivos da análise SWOT, a partir de uma perspectiva analítica e de compreensão:

Figura 3. Matriz de supervisão

	POSITIVA/ ÚTIL para atingir a meta	NEGATIVA/ PREJUDICIAL para atingir a meta
Origem INTERNA fatos/ fatores da organização	Pontos Fortes As coisas boas de hoje deverão ser mantidas, servir de base para que se construa sobre elas e usadas como alavanca	Pontos Fracos As coisas más deverão ser corrigidas, mudadas ou interrompidas
Origem EXTERNA fatos/ fatores do ambiente em que opera a organização	Oportunidades As coisas boas para o futuro, deverão ser priorizadas, capturadas, servir de base para que se	Ameaças As coisas más para o futuro deverão constar dos planos para que sejam gerenciadas ou neutralizadas

Fonte: Hofrichter (2017, p. 05)

Nesse sentido, a Matriz FOFA é um feita a partir de um processo de identificação onde são apresentados as forças e vulnerabilidades (onde se deve atacar ou defender). O resultado de todo esse processo é um plano de atuação ou plano de ação. Há várias maneiras de realizar essa análise, podendo ser feita em serviços, produtos, empresas e até mesmo em um indivíduo (CALICCHIO, 2020)

O processo de realização da análise SWOT é sempre o mesmo, começa com a condução de entrevistas e organização de grupos para discutir ideias, preparando as perguntas referentes ao produto ou empresa que se está analisando. Logo depois, é hora de preparar uma lista de todas as oportunidades existentes no futuro, e, todas as ameaças que possam vir a existir. Tendo isso em mãos, chega a hora de criar um plano de ação para abordar cada uma das quatro áreas: Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças (CALICCHIO, 2020)

3. CONCLUSÃO

Matriz SWOT e planejamento são conceitos bastante utilizados na área de gestão. O autoconhecimento é essencial na tomada de decisões, e quando se trata do ambiente organizacional, o processo não diverge. Organizações e indivíduos necessitam de confiança para seguir em seus processos e produtos, e para isso, faz-se necessário a análise de diversos aspectos fundamentais para se chegar em um resultado satisfatório.

É nesse contexto que se encaixam ferramentas que auxiliam na execução do planejamento estratégico a análise SWOT. Está última trata-se de uma ferramenta utilizada para melhorar e complementar o planejamento através de análises e levantamentos de dados. No entanto, para que isto seja possível, é necessário que o profissional respeite e conheça detalhadamente a ferramenta, bem como o ambiente interno e externo da organização.

Portanto cabe ao profissional responsável pela aplicação e execução da matriz SWOT, levantar o maior número de dados e informações, tais como forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, com objetivo de ter uma visão mais ampla do cenário geral da empresa. Nesse sentido, destaca-se a importância de uma análise contínua acerca da temática proposta, considerando que todos os aspectos e fatores abordados em uma análise SWOT são pertinentes para os desdobramentos de uma empresa.

Abordar a importância da análise SWOT sob a perspectiva do desenvolvimento de um negócio é necessário aos dias atuais, uma vez que inúmeros fatores estão associados ao mal desempenho de um negócio, bem como o seu fechamento. Esse fato se dá através da falta de um planejamento sistemático e organizativo, além da falta de análise do cenário em que a empresa pretende atuar. Assim, é imprescindível ampliar o debate acerca desse estudo, compreendendo a importância do processo de organização e de uma análise acerca da dinâmica empresarial.

REFERÊNCIAS

- CALICCHIO, Stefano. **A análise swot em 4 etapas: Como utilizar a matriz SWOT para fazer a diferença na carreira e nos negócios**. 1. ed. Rio de Janeiro. Revolução Ebook, 2020.
- CHIAVENATO, Idalberto; SAPIRO, Arão. **Planejamento Estratégico: fundamentos e aplicações**. 1. ed. 13º tiragem. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.



CORRÊA, Henrique L. **A história da gestão de produção e operações**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/39733852_A_Historia_da_Gestao_de_Producao_e_Operacoes> Acesso em: 24 maio. 2021.

FERNANDES, Djair Roberto. **Uma Visão Sobre a Análise da Matriz SWOT como Ferramenta para Elaboração da Estratégia**. 2020.

FRANCO, Inês. **Elaboração de um planejamento operacional**. 2020.

HOFRICHTER, Markus. **Análise swot: quando usar e como fazer**. 1. ed. Porto Alegre. Revolução Ebook, 2017.

LOPES, Samuel C. et alli. **Administração estratégica**. 2. ed. São Paulo: Person, 2017.

MARTINS, Leandro. **Marketing: Como se tornar um profissional de sucesso**. 1. ed. São Paulo: Digerati Books, 2016.

MARTINS, Marcos Amâncio P. **Gestão Educacional: planejamento estratégico e marketing**. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2017.

OLIVEIRA, Djalma P. R. **Planejamento estratégico: conceitos, metodologia, práticas**. 24. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

PÔNCIO, Rafael José. **O que é Planejamento**. Disponível em < <https://administradores.com.br/artigos/o-que-e-planejamento>> Acesso em: 02 de abr. de 2023.

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica das principais abordagens de gestão da produção aplicadas à manutenção industrial, com foco na otimização da produtividade das equipes. Diante dos desafios enfrentados pelas empresas para manter operações eficientes e reduzir custos, a pesquisa examina métodos como a Manutenção Produtiva Total (TPM), *Kaizen*, manutenção preditiva e baseada em condição (CBM), além dos princípios do *lean manufacturing* na eliminação de desperdícios. Foram analisados estudos relevantes publicados nas últimas três décadas e meia, utilizando as palavras-chave “gestão da produção”, “manutenção industrial”, “produtividade”, “TPM” e “lean”. A revisão revela que a aplicação estratégica dessas abordagens melhora a confiabilidade dos ativos, a moral das equipes e o clima organizacional. O estudo oferece recomendações para a adoção dessas práticas, evidenciando seu potencial para aumentar a eficiência e o comprometimento das equipes. Conclui-se que a integração de práticas avançadas de manutenção e gestão de produção é essencial para a competitividade industrial.

Palavras-chave: Artigo, Normas, Formatação.

Abstract

This article presents a literature review of the main production management approaches applied to industrial maintenance, focusing on optimizing team productivity. Faced with the challenges companies face in maintaining efficient operations and reducing costs, the research examines methods such as Total Productive Maintenance (TPM), *Kaizen*, predictive maintenance, and condition-based maintenance (CBM), in addition to lean manufacturing principles for waste elimination. Relevant studies published over the past three and a half decades were analyzed using the keywords “production management,” “industrial maintenance,” “productivity,” “TPM,” and “lean.” The review reveals that the strategic application of these approaches improves asset reliability, team morale, and organizational climate. The study offers recommendations for adopting these practices, highlighting their potential to increase efficiency and team commitment. It concludes that integrating advanced maintenance and production management practices is essential for industrial competitiveness.

Keywords: Operational optimization, Maintenance productivity, Maintenance strategies, Continuous improvement, Lean Manufacturing

1. INTRODUÇÃO

A produtividade das equipes de manutenção industrial tem sido um tema amplamente discutido na literatura, principalmente devido ao seu impacto direto na eficiência e na competitividade das organizações em um mercado globalizado. Com o aumento das exigências por redução de custos e otimização dos processos produtivos, a manutenção industrial passou a ser considerada não apenas como uma função operacional, mas como um elemento estratégico essencial para a continuidade e qualidade das operações. As abordagens de gestão da produção, especialmente aquelas voltadas para a manutenção, desempenham um papel crucial na busca por eficiência. Métodos como a Manutenção Produtiva Total (*TPM*), proposta por Nakajima (1989), e a filosofia *Kaizen*, difundida por Imai (1990), são frequentemente aplicados no setor industrial, promovendo a melhoria contínua e o engajamento das equipes na preservação e na funcionalidade dos ativos industriais.

No entanto, embora o uso de práticas como *TPM* e *Kaizen* seja comum, a eficácia dessas abordagens nem sempre é garantida, e os desafios na sua aplicação permanecem expressivos. A literatura aponta para a dificuldade de adequação das práticas de manutenção a diferentes contextos organizacionais e operacionais, o que pode limitar o impacto dessas metodologias na produtividade. Questões como a falta de recursos, a insuficiência de treinamento especializado e a carência de tecnologias de monitoramento adequadas muitas vezes impedem que as empresas aproveitem plenamente os benefícios propostos por essas abordagens. Em função desses desafios, surge a seguinte questão central: quais abordagens de gestão da produção, dentro do campo da manutenção industrial, são realmente eficazes para promover a otimização da produtividade?

Este artigo se propõe a responder a essa questão por meio de uma revisão abrangente da literatura, visando sintetizar as principais abordagens e metodologias aplicadas à manutenção industrial com foco na produtividade. A análise aqui realizada concentra-se em examinar os métodos tradicionais, como a manutenção preventiva, bem como abordagens mais recentes, como a manutenção preditiva e a manutenção baseada em condição (*CBM*). Esses métodos são considerados sob a perspectiva de sua eficácia, benefícios e limitações, com o intuito de fornecer um panorama atualizado das opções disponíveis para gestores e especialistas em manutenção industrial. Além disso, o estudo busca identificar fatores críticos que influenciam a aplicabilidade e o sucesso dessas práticas em diferentes contextos.

A relevância desta revisão reside em sua capacidade de consolidar conhecimentos sobre a aplicabilidade das abordagens de manutenção à produtividade, reunindo evidências que permitam aos profissionais do setor compreender melhor os potenciais e as limitações de cada metodologia. Para a academia, a revisão oferece uma visão ampla das lacunas existentes na literatura, apontando áreas que podem ser exploradas em pesquisas futuras. Essa análise também pode servir como uma referência útil para pesquisadores que desejam aprofundar o entendimento sobre o papel da gestão da manutenção na eficiência produtiva.

Por fim, este trabalho apresenta recomendações para a utilização das práticas de gestão da manutenção no contexto industrial, de acordo com os achados e limitações identificados na literatura. Essas recomendações, embora não representem proposições interventivas diretas, oferecem insights práticos que podem auxiliar organizações a estruturar suas práticas de manutenção com base nas metodologias mais bem fundamentadas e eficientes. Assim, o artigo contribui para uma base teórica robusta, facilitando tanto a

aplicação prática quanto o desenvolvimento acadêmico no campo da gestão da produção voltada à manutenção industrial.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Esta pesquisa utiliza uma abordagem metodológica baseada em revisão de literatura. Foi realizada uma busca sistemática em bases de dados acadêmicas, como *Scopus*, *Google Scholar* e *Web of Science*, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, incluindo os termos “gestão da produção”, “manutenção industrial”, “produtividade”, “Manutenção Produtiva Total (TPM)”, “estratégias de manutenção” e “metodologia *lean*”. Foram selecionados estudos relevantes dos últimos 35 anos que contemplem as diferentes abordagens de gestão da produção aplicadas à otimização da produtividade das equipes de manutenção industrial. A análise dos estudos selecionados foi realizada de forma crítica, identificando padrões, tendências e lacunas na literatura existente. Os resultados foram sintetizados e elencados de maneira clara e objetiva, fornecendo insights para utilização nos múltiplos setores industriais e sugestões para futuras pesquisas nesta área.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Abordagens de Manutenção e Gestão da Produção

As abordagens de manutenção e gestão da produção têm evoluído significativamente para atender à crescente demanda por eficiência e redução de custos nas operações industriais. Os métodos tradicionais, como a manutenção preventiva e corretiva, ainda são amplamente utilizados. Segundo Jardine, Lin e Banjevic (2006), a manutenção preventiva é baseada em intervalos de tempo ou no uso do equipamento, buscando reduzir falhas inesperadas. No entanto, pode ocasionar atividades de manutenção desnecessárias, gerando custos operacionais elevados. A manutenção corretiva, por sua vez, é realizada somente após a ocorrência de uma falha e é discutida por Smith e Hinchcliffe (2004) como uma abordagem eficaz para restaurar rapidamente a operação dos equipamentos, embora tenha o custo de interrupções inesperadas e reparos emergenciais. Em conjunto, essas abordagens fornecem uma base sólida para o planejamento de manutenção, mas enfrentam limitações frente às exigências modernas de previsibilidade e eficiência operacional.

Com o avanço da tecnologia, abordagens mais sofisticadas surgiram, como a manutenção preditiva (*PdM*) e a manutenção baseada em condição (*CBM*). A *PdM* utiliza monitoramento e análise de dados para prever falhas, permitindo que a manutenção seja realizada de forma mais precisa e oportuna. Jardine, Lin e Banjevic (2006) ressaltam que essa abordagem reduz custos ao evitar intervenções desnecessárias e melhora a produtividade ao minimizar o tempo de inatividade dos equipamentos. A *CBM*, segundo Mobley (2002), baseia-se na condição real dos equipamentos, o que permite intervenções somente quando necessário. Em ambientes onde a operação contínua é essencial, a *CBM* se destaca como uma opção eficaz, já que utiliza diagnósticos avançados e aumenta a disponibilidade dos equipamentos, resultando em economias de custo significativas.

Além das abordagens avançadas, estratégias mais recentes, como a manutenção *lean* e a Manutenção Produtiva Total (*TPM*), têm se mostrado promissoras. A manutenção *lean*, inspirada nos princípios do *Lean Manufacturing*, foca na eliminação de desperdícios

em todas as atividades de manutenção. Womack e Jones (1996) destacam que, ao simplificar processos e reduzir tempos de espera, essa abordagem melhora a eficiência e produtividade da equipe. A *TPM*, desenvolvida por Nakajima (1988), promove uma cultura de responsabilidade compartilhada entre os colaboradores, incentivando o engajamento de todos os níveis na preservação dos equipamentos e na prevenção de falhas. Além disso, a Manutenção Baseada em Confiabilidade (RCM) é mencionada por Moubray (1997) como uma abordagem que foca em assegurar que os ativos mantenham suas funções no contexto operacional atual, priorizando as atividades de manutenção que são mais críticas para a operação.

Essas metodologias são complementadas por práticas de gestão de produção, como o *Just-in-Time (JIT)*, que, conforme Ohno (1988), minimiza o estoque de peças e materiais e permite um fluxo mais ágil para a equipe de manutenção. O *Total Quality Management (TQM)*, conforme descrito por Deming (1986), também contribui para o aprimoramento contínuo da qualidade dos processos de manutenção, enquanto o *Six Sigma*, conforme Pande, Neuman e Cavanagh (2000), utiliza métodos estatísticos rigorosos para reduzir falhas e otimizar a eficiência da equipe.

2.2.2 Os Sete Desperdícios do *Lean Manufacturing* e sua Aplicação na Manutenção

Os sete desperdícios do *Lean Manufacturing* (superprodução, espera, transporte, processamento excessivo, inventário, movimentação e defeitos), conforme definidos por Ohno (1997), são altamente relevantes para a manutenção industrial, pois ajudam a identificar atividades que consomem tempo e recursos sem agregar valor ao serviço principal, ou seja, o ativo mantido e liberado para operação segura. Cada um desses desperdícios pode ser observado na rotina da manutenção e, quando eliminados ou minimizados, liberam tempo e energia da equipe para focar em tarefas essenciais de manutenção.

Superprodução ocorre quando atividades de manutenção são realizadas antes de serem necessárias, como revisões preventivas em intervalos excessivos. Esse tipo de desperdício consome recursos, pois gera intervenções desnecessárias e eleva custos. A aplicação de manutenção preditiva e baseada em condição ajuda a eliminar a superprodução ao assegurar que a manutenção seja feita com base no estado real do equipamento, como sugerido por Mobley (2002).

A espera, definida por Ohno (1997) como o tempo de inatividade causado pela falta de recursos, informações ou processos disponíveis, é um dos desperdícios clássicos identificados no *Lean Manufacturing*. Na manutenção industrial, a espera representa o tempo perdido quando a equipe aguarda por ferramentas, peças ou informações. Esse desperdício é recorrente quando os processos de planejamento e suprimento são ineficazes. Segundo Ohno (1997), o *Just-in-Time* é uma solução eficaz para mitigar esse problema, garantindo que os recursos estejam disponíveis exatamente no momento necessário, o que minimiza interrupções e aumenta a produtividade.

O transporte, caracterizado por Ohno (1997) como o movimento desnecessário de materiais ou ferramentas entre etapas de um processo, é outro desperdício identificado no *Lean Manufacturing*. Ele afeta diretamente a eficiência das operações, pois consome tempo e recursos sem agregar valor ao produto final. Na manutenção industrial, a disposição física das oficinas e o armazenamento adequado de peças e ferramentas desempenham um papel crucial na redução do transporte. Estratégias como a organização de *layout lean* e a alocação inteligente de recursos permitem que a equipe acesse os mate-



riais rapidamente, economizando tempo e permitindo maior foco nas tarefas de maior valor agregado. Conforme Womack e Jones (2004), uma configuração eficiente do espaço é indispensável para otimizar o fluxo e evitar deslocamentos desnecessários, aumentando a eficácia do trabalho.

Processamento excessivo acontece quando a equipe realiza etapas adicionais que não agregam valor ao ativo. Exemplos incluem verificações redundantes ou relatórios complexos. A implementação de processos enxutos, como os defendidos por Womack e Jones (1996), permite simplificar e padronizar atividades, eliminando etapas desnecessárias e liberando tempo para a equipe se focar no serviço essencial.

Inventário, ou estoque excessivo de peças e materiais, gera custos de armazenamento e pode dificultar a organização. A prática do *JIT*, conforme descrita por Ohno (1988), ajuda a manter apenas o estoque necessário, promovendo uma operação enxuta e melhorando o fluxo de trabalho da equipe de manutenção.

A movimentação, definida por Womack e Jones (2004) como o deslocamento desnecessário de pessoas ou equipamentos dentro de um processo, é um desperdício comum no contexto do *Lean Manufacturing*. Na manutenção industrial, isso inclui deslocamentos redundantes da equipe, como buscar ferramentas distantes ou mover-se repetidamente entre locais de trabalho. Assim como para a redução de transportes, a organização eficiente do layout, aliada ao uso de kits de ferramentas portáteis, pode reduzir significativamente esses movimentos. Womack e Jones (2004) destacam que a reorganização do espaço de trabalho com base nos princípios *lean* é essencial para que a equipe tenha todos os recursos necessários ao alcance, otimizando o tempo de resposta e melhorando a execução das tarefas.

Por fim, defeitos ocorrem quando há erros de manutenção, que podem resultar em falhas do equipamento e na necessidade de retrabalho. A adoção de práticas como o *Six Sigma* (Pande, Neuman e Cavanagh, 2000) contribui para identificar e eliminar causas de erros, aumentando a precisão das intervenções e reduzindo a probabilidade de retrabalho. Reduzir defeitos significa não só menor custo, mas também maior confiabilidade dos equipamentos.

Com a eliminação desses desperdícios, a equipe de manutenção pode concentrar seus esforços em atividades que realmente agreguem valor, como o diagnóstico de problemas e a liberação segura e eficaz dos ativos para operação. Em suma, a aplicação dos princípios do *Lean Manufacturing* no contexto da manutenção reforça a importância de uma gestão que valorize o tempo da equipe e seu foco em atividades essenciais para a continuidade operacional segura dos ativos.

2.2.3 Fatores Influenciadores da Eficácia das Abordagens

A eficácia das abordagens de manutenção e gestão da produção na otimização da produtividade depende de uma série de fatores, entre eles a complexidade dos equipamentos, a disponibilidade de recursos, a qualificação da equipe e a cultura organizacional. Nakajima (1988) observa que a complexidade dos equipamentos afeta diretamente a escolha das técnicas de manutenção, pois equipamentos mais sofisticados podem requerer abordagens como a *CBM* para monitoramento e diagnóstico adequado de falhas potenciais. Quando a tecnologia dos equipamentos é mais avançada, torna-se imprescindível investir em manutenção baseada em condição e preditiva, assegurando que a equipe consiga prever e mitigar problemas antes que eles ocorram.

A disponibilidade de recursos, tanto humanos quanto financeiros, também influencia a adoção das melhores práticas de manutenção. Segundo Slack, Chambers e Johnston (2010), a falta de recursos pode dificultar a implementação de técnicas avançadas, como a *PdM*, pois esse tipo de abordagem frequentemente exige investimentos em sensores, software de análise e treinamento para que o monitoramento em tempo real seja efetivo. Sem esses recursos, as organizações podem se ver limitadas a abordagens tradicionais, o que restringe o potencial de aumento de produtividade.

Outro fator determinante é a qualificação da equipe de manutenção, conforme observado por Tsang (2002). Uma equipe tecnicamente qualificada é fundamental para garantir que as estratégias sejam implementadas corretamente e que as novas tecnologias sejam utilizadas de forma eficaz. O treinamento contínuo e o desenvolvimento profissional são indispensáveis para manter a equipe atualizada com as práticas mais avançadas e preparadas para manusear ferramentas e sistemas modernos. A falta de capacitação pode resultar em intervenções inadequadas e na subutilização das tecnologias implantadas, reduzindo o retorno dos investimentos feitos.

Por fim, a cultura organizacional desempenha um papel essencial no sucesso das abordagens de manutenção. Schein (2010) afirma que uma cultura organizacional que valoriza a inovação, a prevenção e a adoção de novas tecnologias facilita a implementação de práticas de manutenção avançadas. Em uma cultura que prioriza a eficiência e a melhoria contínua, as equipes tendem a adotar uma postura proativa, buscando constantemente aprimorar os processos e reduzir falhas, o que maximiza a eficácia das práticas de manutenção.

2.2.4 Recomendações para Utilização

Com base na revisão da literatura e na análise das abordagens de manutenção e gestão da produção, recomenda-se que as organizações realizem uma avaliação detalhada dos equipamentos para identificar aqueles que são mais críticos e complexos. Essa análise é fundamental para definir se uma abordagem avançada, como a *CBM* ou a *PdM*, será necessária, conforme observado por Mobley (2002) e Jardine, Lin e Banjevic (2006). Equipamentos críticos que impactam diretamente o fluxo produtivo e que têm alta complexidade de operação devem ser priorizados, pois a aplicação de técnicas preditivas e de monitoramento contínuo tende a aumentar a confiabilidade e disponibilidade operacional.

Outro ponto importante é o investimento em tecnologias de monitoramento e diagnóstico, como sensores e software de análise de dados, que suportam a manutenção preditiva. A manutenção preditiva, embora inicialmente custosa, proporciona benefícios significativos ao permitir que a equipe de manutenção atue preventivamente, minimizando custos com reparos emergenciais e tempo de inatividade, como descrito por Pande, Neuman e Cavanagh (2000). O uso de tecnologias como sensores e análise de dados melhora a previsibilidade e permite uma manutenção mais direcionada e eficiente.

O desenvolvimento da equipe de manutenção é outra recomendação essencial. Tsang (2002) destaca que programas de treinamento e capacitação contínuos são essenciais para preparar a equipe para o uso de tecnologias modernas e para a adoção de práticas inovadoras. O desenvolvimento de uma equipe bem treinada garante uma maior qualidade na execução das manutenções e uma utilização plena das ferramentas de diagnóstico e monitoramento, reduzindo erros e aumentando a eficiência das operações.

A cultura organizacional também precisa apoiar e valorizar a manutenção preventiva



e preditiva. Schein (2010) sugere que a criação de uma cultura voltada para a inovação e melhoria contínua promove um ambiente onde as equipes de manutenção podem adotar novas práticas com mais facilidade. Incentivar os colaboradores a participarem ativamente de processos de melhoria e a colaborarem na identificação de falhas e oportunidades torna a manutenção um processo mais integrado à organização, com todos os setores envolvidos na preservação dos ativos e na continuidade do processo produtivo.

Finalmente, a integração dos princípios *lean* e *kaizen* nas operações de manutenção é uma recomendação que pode trazer ganhos expressivos. Womack e Jones (1996) observam que, ao simplificar processos e reduzir desperdícios, o *lean* proporciona uma operação mais ágil, enquanto o *Kaizen* incentiva melhorias contínuas. Em conjunto, essas práticas garantem que os processos de manutenção sejam realizados de forma eficiente e com foco na agregação de valor, resultando em uma operação de manutenção mais resiliente, produtiva e capaz de sustentar a competitividade industrial no longo prazo.

3. CONCLUSÃO

A otimização da produtividade das equipes de manutenção industrial é essencial para a competitividade das empresas no cenário global. As abordagens de gestão da produção, desde métodos tradicionais como a manutenção preventiva e corretiva até estratégias avançadas como a manutenção preditiva e *CBM* (Jardine, Lin e Banjevic, 2006; Mobley, 2004), oferecem diferentes vantagens e desafios. A eficácia dessas abordagens depende de uma série de fatores, incluindo a complexidade dos equipamentos, a disponibilidade de recursos, a qualificação da equipe e a cultura organizacional (Schein, 2010). Compreender e implementar as estratégias mais adequadas pode resultar em melhorias significativas na eficiência operacional e na competitividade das empresas industriais (Nakajima, 1989).

Destaca-se que a aplicação dos princípios do *lean manufacturing* no contexto da manutenção industrial demonstra potencial eficácia na eliminação de desperdícios, simplificação de processos e redução do tempo improdutivo das equipes (Womack e Jones, 1996). Ao eliminar atividades que não agregam valor, como movimentações desnecessárias e tempos de espera excessivos, as equipes de manutenção podem focar em intervenções que realmente aumentam a confiabilidade dos ativos, promovendo uma operação mais segura e eficiente (Ohno, 1988). Além disso, o suporte adequado às equipes de manutenção, por meio de planejamentos apropriados e do uso de tecnologias de monitoramento, contribui para um ambiente de trabalho mais produtivo, fortalecendo o moral dos colaboradores e gerando uma melhoria significativa do clima organizacional (Nakajima, 1989; Schein, 2010). Essa combinação de estratégias não apenas eleva a eficiência operacional, mas também fortalece o compromisso das equipes com a qualidade das operações, destacando a importância de uma gestão que valorize tanto o aspecto técnico quanto o humano na manutenção industrial.

Para maximizar os benefícios das abordagens de gestão da produção, é crucial que as empresas adotem uma visão integrada e holística da manutenção. Isso inclui não apenas a implementação de tecnologias avançadas e metodologias de gestão (Moubray, 1997; Tsang, 2002), mas também a criação de um ambiente organizacional que apoie a inovação, o desenvolvimento contínuo da equipe e a melhoria contínua dos processos (Imai, 1990). Ao fazer isso, as empresas podem não apenas otimizar a produtividade das equipes de manutenção, mas também criar um sistema de produção mais resiliente, eficiente e competitivo (Ohno, 1997; Womack e Jones, 2004).

REFERÊNCIAS

- DEMING, W. E. **Saindo da crise**. 1. ed. São Paulo: Editora Atlas, 1990.
- IMAI, M. **Kaizen: a chave para a vantagem competitiva japonesa**. 1. ed. São Paulo: IMAM, 1990.
- JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483-1510, 2006.
- MOBLEY, R. K. **Introdução à manutenção preditiva**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.
- MOUBRAY, J. **Manutenção centrada na confiabilidade**. 2. ed. São Paulo: IMC International, 1997.
- NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM: manutenção produtiva total**. 1. ed. São Paulo: IMC International, 1989.
- OHNO, T. **Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 1997.
- PANDE, P. S.; NEUMAN, R. P.; CAVANAGH, R. R. **A revolução Six Sigma: como a General Electric e outras grandes empresas estão obtendo um desempenho espetacular**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2001.
- SCHEIN, E. H. **Cultura organizacional e liderança**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- SMITH, R.; HINCHCLIFFE, G. **RCM: gateway to world class maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004.
- TSANG, A. H. C. *Strategic dimensions of maintenance management*. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 8, n. 1, p. 7-39, 2002.
- WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.



Engenharia Elétrica





A RELAÇÃO ENTRE A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

THE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRICITY PRODUCTION AND THE OPERATION OF THE ELECTRIC POWER SYSTEM

Alexandre França de Sá
Paulo José Pinto Souza

13

Resumo

Este artigo explora o papel fundamental do Sistema Elétrico de Potência (SEP) no fornecimento de eletricidade confiável para a população brasileira, sustentando o cotidiano, as indústrias e serviços essenciais, como hospitais. A produção em larga escala de energia elétrica, principalmente por meio de hidrelétricas, exige o desenvolvimento de novas tecnologias para otimizar a transmissão em longas distâncias. O estudo justifica-se pela relevância do SEP na melhoria da qualidade de vida e segurança nas residências, abordando questões como surtos e apagões. A pesquisa utiliza uma metodologia qualitativa descritiva, baseada em uma revisão de literatura dos últimos 10 anos, centrada no funcionamento do SEP e seus componentes. O objetivo geral é compreender o funcionamento do SEP, com ênfase na exploração de tecnologias que possam aprimorar seu desempenho. O estudo também analisa o desenvolvimento futuro do sistema, especialmente os desafios impostos pela crescente demanda de energia e pela integração de fontes renováveis intermitentes. A conclusão destaca a importância dos avanços tecnológicos para garantir a eficiência, confiabilidade e segurança do SEP, de modo a atender às crescentes necessidades energéticas da sociedade.

Palavras-chave: SEP. Transmissão de energia. Fontes de energia. Distribuição.

Abstract

This paper explores the fundamental role of the Electric Power System (EPS) in providing reliable electricity to the Brazilian population, sustaining daily life, industries and essential services, such as hospitals. Large-scale production of electricity, mainly through hydroelectric plants, requires the development of new technologies to optimize transmission over long distances. The study is justified by the relevance of the EPS in improving the quality of life and safety in homes, addressing issues such as surges and blackouts. The research uses a descriptive qualitative methodology, based on a literature review of the last 10 years, focused on the functioning of the EPS and its components. The overall objective is to understand the functioning of the EPS, with an emphasis on exploring technologies that can improve its performance. The study also analyzes the future development of the system, especially the challenges posed by the growing energy demand and the integration of intermittent renewable sources. The conclusion highlights the importance of technological advances to ensure the efficiency, reliability and safety of the EPS, in order to meet the growing energy needs of society.

Keywords: SEP. Power transmission. Energy sources. Distribution.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica desempenha um papel fundamental no cotidiano da população brasileira, sendo imprescindível para diversos aparelhos de uso diário, bem como para a indústria, comércio e serviços essenciais, como hospitais e unidades de saúde. A produção em larga escala de energia elétrica para abastecer cidades e centros urbanos é predominantemente realizada através de hidrelétricas, exigindo constantemente o desenvolvimento de novas tecnologias para otimizar a transmissão, especialmente em longas distâncias (Gomes, 2023).

A utilização da energia elétrica tornou-se uma necessidade básica para a maioria da população mundial, e o sistema elétrico de potência é fundamental para garantir o fornecimento dessa energia. Esse sistema é composto por centrais elétricas, subestações, receptores e linhas de transmissão, constituindo um complexo sistema que leva a energia elétrica do ponto de geração até as cidades e residências (Pereira Júnior, 2023).

Este trabalho se justifica pela importância do sistema elétrico de potência na melhoria da qualidade de vida e segurança nas residências, ao evidenciar questões como surtos e apagões no fornecimento de energia elétrica. Além disso, contribui para o meio acadêmico, oferecendo uma pesquisa específica sobre o sistema elétrico de potência e suas características básicas.

A produção de energia elétrica é essencial para o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP), que inclui a geração, transmissão e distribuição de eletricidade. No entanto, a crescente demanda por energia, aliada à integração de fontes renováveis intermitentes, desafia a estabilidade e a eficiência do SEP. Assim, surge a necessidade de investigar como o aumento da produção de energia elétrica, especialmente a partir de fontes renováveis, afeta a operação e a confiabilidade do sistema. Diante disso, o problema de pesquisa é: Como a variação na produção de energia elétrica impacta o desempenho e a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP)?

O objetivo principal deste trabalho é compreender o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP), abordando suas diferentes vertentes e explorando novas tecnologias que possam aprimorar seu desempenho. Como objetivos específicos, destaca-se a descrição detalhada do SEP e seu funcionamento, além da análise das tecnologias aplicáveis para melhorias nesse sistema. O estudo visa também entender o desenvolvimento futuro do SEP, com foco na descrição de sua eficiência e segurança, buscando atender às crescentes demandas por energia elétrica e garantir um fornecimento confiável para a sociedade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi a revisão de literatura sobre a relação entre a produção de energia elétrica e o funcionamento do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é fundamental para entender os avanços e desafios desse setor. Esse processo de revisão focará em identificar tecnologias e abordagens recentes que impactam diretamente a eficiência e a segurança dos SEPs. As bases de dados utilizadas serão

IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus e Google Scholar, com ênfase em estudos dos últi-



mos dez anos, visando assegurar a atualidade dos dados. O escopo do levantamento inclui as diversas fontes de geração de energia, como hidrelétricas, usinas térmicas, eólicas e solares, além da integração dessas fontes renováveis aos sistemas tradicionais de energia. Trabalhos que abordem a operação e a manutenção do SEP, com foco em melhorar a confiabilidade e estabilidade do sistema, serão prioritários.

Os critérios de exclusão também são fundamentais para garantir a relevância do estudo. Serão descartados artigos e publicações que não abordem diretamente o SEP ou estejam fora do período de dez anos, além de materiais sem dados quantitativos ou qualitativos sobre eficiência e segurança no SEP.

2.2 Resultados e Discussão

No ano de 1882, Thomas Edison construiu o primeiro sistema de distribuição de eletricidade nos Estados Unidos. No entanto, no final da década de 1880, os sistemas de distribuição da Edison enfrentaram a concorrência de uma alternativa mais flexível e acessível projetada por Nikola Tesla, George Westinghouse e outros. Enquanto os sistemas de eletricidade de Edison utilizavam corrente contínua (CC), Tesla e outros promoveram a adoção de sistemas de corrente alternada (CA), entrando em competição direta com Edison (IER, 2016).

Segundo Alves (2023), o sistema elétrico de potência é resultado da evolução tecnológica natural e das constantes regulamentações desde a criação da primeira usina de geração de energia. Em resposta às demandas da sociedade por energia de qualidade, a rede de geração, transmissão e distribuição foi desenvolvida, e as boas práticas foram progressivamente substituindo as menos eficientes.

Após a “guerra das correntes”, ocorrida entre Thomas Edison e Nikola Tesla/George Westinghouse, que debatiam o melhor método de fornecimento de energia, a história mostra uma estagnação no desenvolvimento do setor energético. A partir desse ponto, as pesquisas no setor concentraram-se na busca por fontes de energia mais eficientes, sem necessariamente priorizar alternativas mais ecológicas (Alves, 2023).

As vantagens da corrente alternada foram ficando evidentes, e no final de 1890, ela acabou substituindo a corrente contínua como o padrão para a distribuição de eletricidade. A tecnologia CA permitia que as empresas de energia utilizassem a mesma usina para atender tanto fábricas com demanda por energia de alta voltagem, quanto clientes residenciais que exigiam energia de baixa voltagem. Isso tornou o sistema de corrente alternada mais versátil e eficiente (Pereira Junior *et al.*, 2016).

Consequentemente, a estação Pearl Street, construída por Edison em 1882, foi fechada em 1895 e acabou sendo ofuscada por sistemas de eletricidade muito maiores e mais avançados. Em apenas 13 anos, os novos desenvolvimentos no setor tornaram o sistema de Edison obsoleto (Kim, 2019).

Os princípios fundamentais do sistema de distribuição de eletricidade são semelhantes aos primeiros sistemas de corrente alternada (CA) desenvolvidos por Nikola Tesla e George Westinghouse. Nas subestações de distribuição locais, a voltagem é reduzida por meio de transformadores, que convertem a energia de alta voltagem (por exemplo, até 765.000 volts) para níveis abaixo de 50.000 volts, caracterizando as linhas de distribuição (Da costa *et al.*, 2023).

Após a geração, a energia é elevada para a tensão de transmissão por meio de uma estação elevadora de tensão. No sistema de transmissão, a energia elétrica chega a uma

tensão aproximada de 230 KV, possibilitando a transmissão eficiente de grandes quantidades de corrente elétrica. Nesse sistema, também é possível alimentar grandes consumidores, como usinas siderúrgicas e outras empresas que demandam um alto consumo de energia elétrica (IER, 2016).

De acordo com o Pereira Junior et al. (2016), na figura 1 apresentada na página seguinte, é possível observar o funcionamento de um sistema elétrico de potência. Nesse sistema, a energia é gerada a partir de uma usina de geração, podendo ser de diferentes tipos, como usinas hidrelétricas, eólicas, entre outras. No Brasil, a usina hidrelétrica é a forma mais comum de geração de energia elétrica.

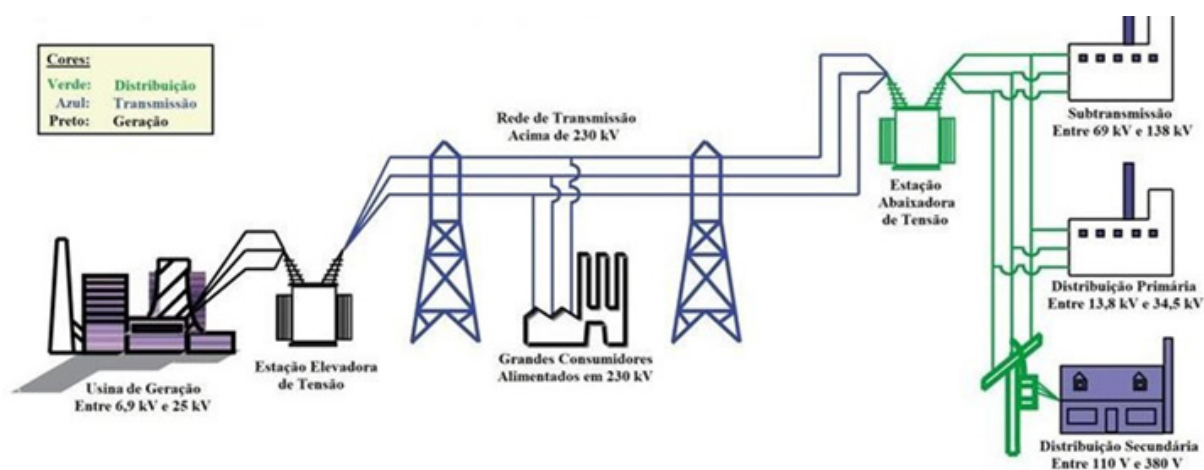


Figura 1. Estrutura Básica do Sistema Elétrico de Potência.

Fonte: IER (2016)

Conforme citado por Lins (2023), após a geração de energia elétrica, esta precisa passar por uma estação abaixadora de tensão, onde sua voltagem é reduzida de 230 KV para 138 KV. Em seguida, a energia é encaminhada para o sistema de distribuição, onde chega a uma tensão aproximada de 138 KV, podendo variar conforme as necessidades específicas.

Nesse sistema de distribuição, a energia elétrica é encaminhada às subestações de energia elétrica, que desempenham o papel de ajustar a tensão para o estado primário, geralmente entre 34,5 KV e 13,8 KV. Essa faixa de tensão é destinada a atender empresas e comércios que realizam um consumo elevado de energia elétrica. As subestações de energia têm a função crucial de adequar a tensão da energia elétrica às necessidades dos consumidores comerciais e industriais, garantindo um fornecimento eficiente e seguro de eletricidade para esses setores (IER, 2016).

De acordo com Barbosa et al. (2022), o sistema elétrico de potência no Brasil apresenta uma estrutura complexa, contando com a participação de diversas empresas empenhadas em assegurar a qualidade final da energia elétrica fornecida. Essa estrutura é hierárquica, tendo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como órgão principal responsável pela regulamentação de todo o sistema.

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) é o órgão de assessoramento do presidente da República e tem como função formular normas nacionais de energia, visando à melhoria contínua da matriz energética brasileira por meio de programas específicos (Lins; Rodrigues, 2023). O Ministério de Minas e Energia (MME) é responsável pela elaboração, implementação e planejamento de ações do governo federal em relação à política energética nacional. O MME detém o poder de concessão no setor (ANEEL, 2017).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é uma organização jurídica

de direito privado, sem fins lucrativos, e é fiscalizada pela ANEEL. A CCEE desempenha um papel crucial na viabilização e comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN). Ela administra os contratos de compra e venda de energia elétrica, bem como sua contabilidade e administração, sendo responsável por toda a parte comercial do sistema. É importante ressaltar que a comercialização da energia elétrica é operada por dois ambientes diferentes (ANELL, 2017).

Segundo Silveira (2024) no Brasil, o sistema elétrico de potência possui dois ambientes distintos: o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulada (ACR). No Ambiente de Contratação Livre (ACL), a energia é destinada a atender consumidores livres, que podem firmar contratos bilaterais diretamente com produtores independentes de energia ou agentes de comércio e geração estatais.

Por outro lado, no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), a energia é direcionada a atender consumidores cativos, que são abastecidos pelas distribuidoras. Estas, por sua vez, são supridas por geradores estatais ou independentes, que vendem energia por meio de leilões públicos anuais. Além disso, o sistema conta com as Agências Estaduais de Energia Elétrica (Cantane; Junior; Hamerschmidt, 2020).

Ainda segundo Cantane; Junior e Hamerschmidt (2020), essas agências possuem poderes estaduais e sua função é descentralizar as atividades da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), reduzindo a necessidade de interferência da ANEEL em situações de menor escala e aprimorando a qualidade dos serviços prestados pelo órgão. Toda a estrutura brasileira de geração e fornecimento de energia tem como objetivo principal garantir a qualidade da energia entregue ao consumidor final, seja em indústrias ou comércios.

No Brasil, os sistemas de geração de energia elétrica tipicamente operam em 13,8 KV, mas também podem ocorrer em outras tensões, variando entre 2 KV e 22 KV. Essa variação ocorre principalmente devido às diferentes capacidades de produção das usinas de geração de energia elétrica, (Kim, 2019).

As usinas hidrelétricas são amplamente utilizadas no país e empregam geradores síncronos, que são as máquinas mais comuns para converter a energia mecânica gerada pelo movimento das águas em energia elétrica. Esse conjunto de máquinas é conhecido como turbina hidráulica, (Lins; Rodrigues, 2023).

Nas usinas térmicas, a queima do carvão é usada para produzir vapor, que aciona a turbina, gerando energia mecânica que é convertida em energia elétrica. Por outro lado, nas usinas eólicas, as pás recebem a energia do movimento do ar, transmitindo essa energia mecânica para um motor síncrono acoplado ao eixo das pás, gerando a energia elétrica (Gomes, 2023).

As usinas térmicas oferecem vantagens em relação às usinas hidrelétricas, como um tempo de construção mais curto e menor investimento inicial. No entanto, possuem um custo operacional elevado, uma vez que requerem o uso de combustíveis fósseis para funcionar. Já nas usinas hidrelétricas e eólicas, embora o investimento inicial seja maior, o custo operacional é considerado baixo, principalmente destinado à manutenção do sistema (Pereira Júnior, 2023).

No modelo tradicional do Sistema Elétrico de Potência (SEP), e ainda na maior parte do sistema elétrico brasileiro, os centros de geração de energia estão localizados a uma certa distância do sistema de cargas, exigindo um sistema de transmissão robusto e eficiente para conectar essas duas partes. Conforme mencionado por Silveira (2024), na Figura 2 é possível observar o diagrama unifilar do sistema elétrico de potência brasileiro, abrangendo desde o sistema de geração até a distribuição, incluindo as possíveis tensões

utilizadas em cada etapa desse sistema.

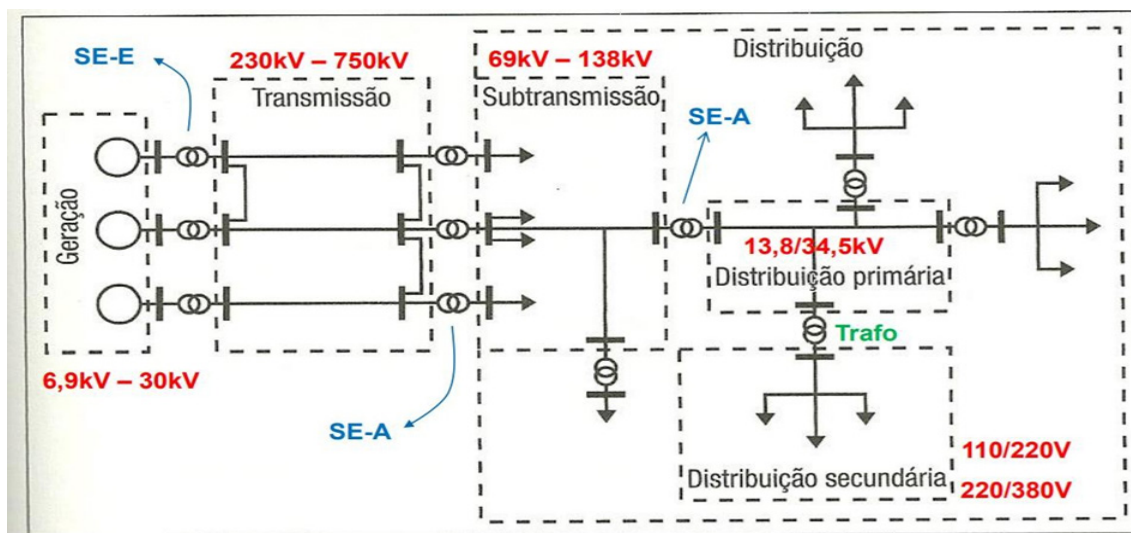


Figura 2. Diagrama Unifilar do SEP

Fonte: IER (2016)

Nesse diagrama, fica evidente como as diferentes etapas do sistema elétrico são interligadas, com a geração de energia ocorrendo em um ponto afastado dos centros de consumo, e a energia sendo transmitida por meio de linhas de transmissão em alta voltagem até as subestações de distribuição. Nessas subestações, a tensão é reduzida para níveis adequados à distribuição para os consumidores finais, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais (Oliveira, 2023).

A tensão elétrica é um dos fatores que passa por diversas mudanças ao longo das etapas do Sistema Elétrico de Potência (SEP), sendo essas adaptações determinadas pelas necessidades específicas de cada fase do sistema. Nas diferentes etapas, ocorrem variações nas tensões para atender às demandas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (Gallotti, 2021). Na etapa de geração de energia, a tensão é geralmente média, variando entre 6,9 KV e 30 KV. Isso ocorre devido à necessidade de produção de grandes quantidades de energia elétrica, o que torna a média tensão adequada para essa fase.

No sistema de transmissão, a energia elétrica é elevada através de subestações, buscando reduzir as perdas que ocorrem ao transmitir eletricidade por longas distâncias. Nesse estágio, são utilizadas tensões mais altas, variando entre 230 KV e 750 KV, o que contribui para minimizar as perdas de energia ao longo das linhas de transmissão. No sistema de distribuição, a tensão da energia elétrica é reduzida novamente por meio de subestações. Isso é feito para facilitar o controle de qualidade da energia a ser distribuída e também para tornar mais prática a distribuição final aos consumidores (Oliveira, 2023).

Segundo Patil e Kundu (2021) nesse tipo de usina, os geradores síncronos são os mais comuns, responsáveis por converter a energia mecânica gerada pelo movimento das águas em energia elétrica. Esse conjunto de máquinas é conhecido como turbina hidráulica. Essas variações de tensão ao longo do SEP são essenciais para garantir a eficiência, segurança e qualidade no fornecimento de energia elétrica para os consumidores, tornando o sistema elétrico brasileiro confiável e bem estruturado para atender às necessidades do país.

A geração de energia elétrica no país ocorre por meio de usinas térmicas, que utilizam a queima de carvão para produzir vapor, acionando a turbina e gerando energia mecânica convertida em eletricidade. Outra fonte comum é a energia eólica, em que pás captam o

movimento do ar e transferem a energia mecânica para um motor síncrono acoplado ao eixo das pás, gerando eletricidade (Silveira, 2024).

De acordo com Kim (2019), as usinas térmicas apresentam vantagens em relação às hidrelétricas, como menor tempo de construção e investimento inicial reduzido. No entanto, possuem alto custo operacional devido à necessidade de combustíveis fósseis para operar. Já as usinas hidrelétricas e eólicas têm alto investimento inicial, mas seus custos operacionais são considerados baixos, principalmente destinados à manutenção do sistema.

O sistema de transmissão de energia elétrica é responsável por transportar a energia desde sua geração até a distribuição, percorrendo às vezes milhares de quilômetros. Para reduzir as perdas na transmissão devido às longas distâncias, a energia gerada é elevada em tensão antes de entrar no sistema de transmissão (Lins; Rodrigues, 2023). Nesses sistemas e transmissão, são inseridas subestações de controle e manutenção ao longo do caminho entre a geração e a transmissão. Essas subestações têm a função de realizar a manutenção da energia transmitida e garantir a qualidade da eletricidade (Kim, 2019).

Na última etapa do sistema de transmissão de energia elétrica, ocorre o rebaixamento da tensão elétrica para torná-la adequada ao sistema de distribuição, evitando problemas relacionados à alta tensão transmitida pelo sistema. Além disso, é importante destacar que, em certos pontos do sistema de transmissão, a energia pode ser destinada a grandes consumidores, geralmente empresas que necessitam de uma quantidade significativa de eletricidade (Oliveira, 2023).

Adicionalmente, no SEP brasileiro, existe o sistema de transmissão por corrente contínua ou HVDC (*High Voltage Direct Current*). Nesse sistema, a energia elétrica é convertida em corrente contínua em altas tensões por meio de uma subestação e é transmitida diretamente até outra subestação, onde é convertida novamente em corrente alternada. A Figura 3 no diagrama unifilar ilustra esse processo (Gallotti, 2021).

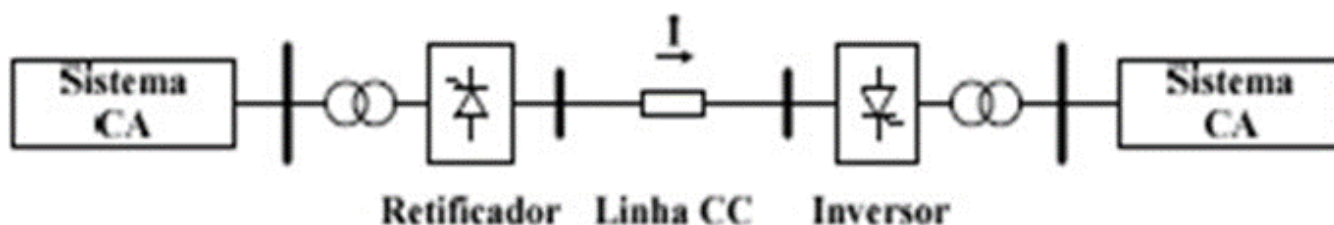


Figura 3. Diagrama unifilar HVDC

Fonte: Gallotti (2021).

O sistema de transmissão por corrente contínua (HVDC) é utilizado no Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro para possibilitar a transmissão de energia elétrica em longas distâncias, o que não seria viável com o sistema de corrente alternada. Um exemplo é a transmissão da energia gerada pela usina internacional de Itaipu (Alves, 2023).

De acordo com Alves (2023), esse sistema de transmissão por HVDC é responsável por captar a energia das subestações de subtransmissão e transferi-la às subestações de distribuição e aos consumidores em tensão de subtransmissão, por meio de linhas trifásicas. Geralmente, a tensão utilizada é de 138 kV, 69 kV ou, raramente, 34,5 kV.

O funcionamento básico do sistema HVDC consiste em converter a energia gerada em corrente alternada para corrente contínua, elevando a voltagem para o valor necessário para a transmissão, que pode variar conforme o percurso desejado (Kim, 2019). Uma das principais vantagens desse sistema é sua alta eficiência, evitando perdas significativas

na transmissão da energia elétrica e proporcionando uma eletricidade de maior qualidade em comparação ao sistema tradicional de transmissão em corrente alternada (Oliveira, 2023).

A Figura 4, ilustra o funcionamento desse sistema, onde a energia elétrica é gerada por meio de um sistema eólico de geração, transmitida a curta distância em corrente alternada até as estações de conversão de HVDC, onde a corrente é convertida para corrente contínua e transmitida pelo sistema HVDC até a estação de inversão, onde é convertida novamente para corrente alternada e distribuída para a cidade ou local de consumo (Conceição *et al.*, 2016).

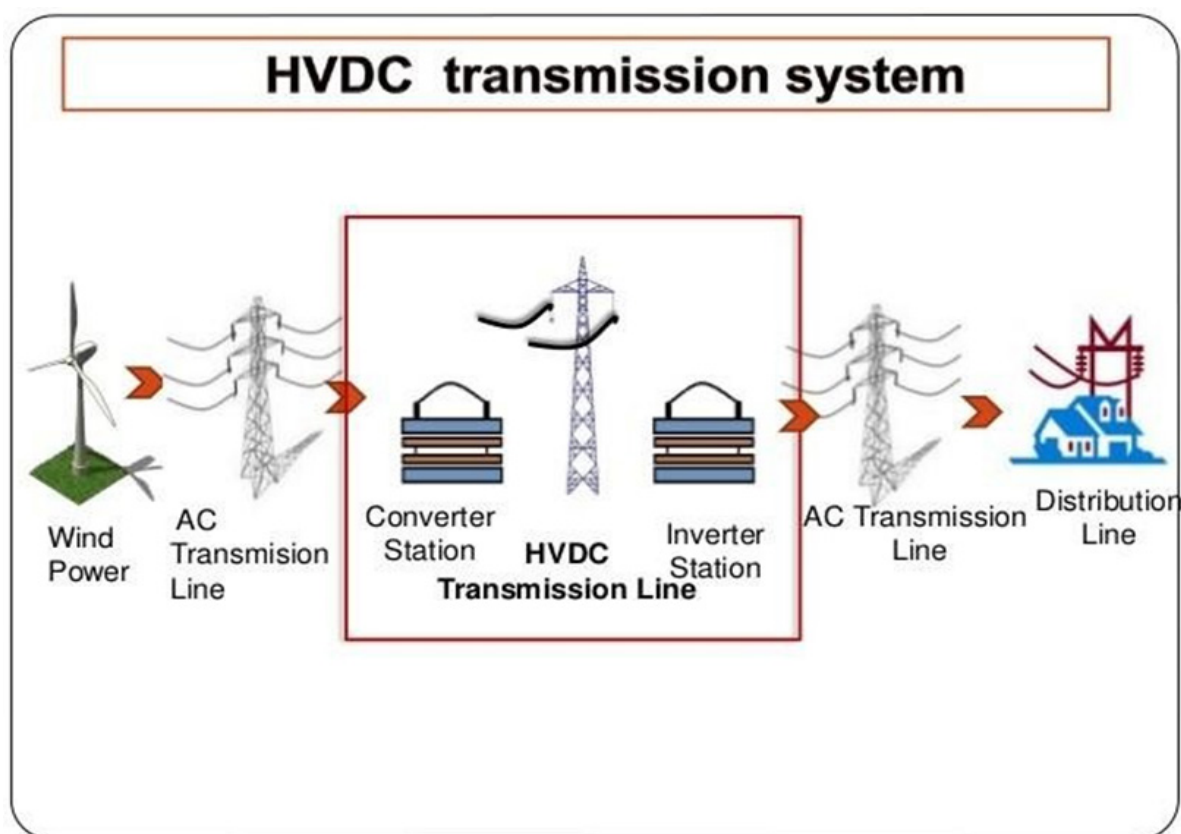


Figura 4. Sistema de transmissão HVDC

Fonte: Siemens (2019).

A utilização do sistema de transmissão por corrente contínua (HVDC) é predominante em países como o Brasil e a China. No Brasil, em 2018, o país contava com duas linhas de transmissão HVDC em funcionamento. A primeira delas é a linha de Madeira, com extensão de 2385 km e potência estimada em 7100 MW, sendo considerada a maior do mundo até aquela data. A segunda linha é a de Estreito, que liga Minas Gerais a Xingu no Paraná, com 2180 km de extensão e potência estimada em 4000 MW, percorrendo o estado de São Paulo com essa tecnologia (Alves, 2023).

Segundo Gomes (2023), apesar de ser um método considerado caro para a transmissão de energia elétrica, o HVDC oferece uma grande margem de expansão e um sistema de maior qualidade em comparação com a transmissão tradicional em corrente alternada (CA). Além disso, é importante destacar que o sistema HVDC ocupa menos espaço, utilizando torres menores e menor quantidade de cabeamento, o que resulta em custos reduzidos tanto para os cabos quanto para as torres utilizadas.

A expressão “*Smart Grid*” foi mencionada pela primeira vez em um artigo intitulado

“Toward a Smart Grid”. Até o momento, diversas definições foram atribuídas a esse termo, mas todas elas têm em comum a aplicação de novas tecnologias digitais e de comunicação nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica (Patil; Kundu, 2021).

De acordo com Patil e Kandu (2021), para ser claro, as redes de energia inteligentes são capazes de automatizar todo o processo de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica, utilizando tecnologias avançadas de comunicação, ferramentas computacionais e automação industrial. Diversas definições foram criadas para as redes elétricas inteligentes (REI), ou sistemas de automação em redes elétricas, mas a mais aceita delas é a definição que as considera como redes de distribuição e transmissão de energia elétrica que permitem o movimento nos dois sentidos, tanto da concessionária para o cliente, quanto do cliente para a concessionária (Kim, 2019).

Em um sistema de rede elétrica inteligente, é necessário um sistema automatizado capaz de realizar a leitura e interpretação da entrada e saída da energia elétrica, garantindo uma melhor distribuição das cargas no sistema de distribuição (Silveira, 2024). Entretanto, essa tecnologia ainda é pouco aplicada aos sistemas de transmissão convencionais, exigindo grandes adaptações para sua implementação.

O sistema Smart Grid é a integração bidirecional de uma ampla variedade de fontes de geração de energia elétrica, onde um sistema de monitoramento automatizado tem a função de controlar o sistema Smart Grid permite o controle remoto da rede de distribuição, assegurando a prevenção de falhas no fornecimento de energia elétrica (Patil; Kundu, 2021).

Em caso de falha na distribuição, o sistema Smart Grid age de forma automática e imediata, isolando o local onde ocorreu o problema. Isso permite que a falha seja identificada prontamente e que os profissionais responsáveis possam trabalhar na sua solução com maior segurança (Barbosa *et al.*, 2022). Além disso, o sistema redireciona a energia para evitar que a falha afete o restante dos locais de distribuição, minimizando o impacto em casas e outros locais.

Conforme Pereira Júnior *et al.* (2023), as redes inteligentes de transmissão de energia elétrica oferecem uma eficiência muito superior ao sistema tradicional, fornecendo relatórios frequentes sobre os picos de energia gerados e sua origem. Isso permite que problemas como esse sejam solucionados de forma rápida e eficaz.

Além disso, é crucial adotar tecnologias que impulsionem a evolução do SEP, incluindo a automação e a indústria 4.0 nos componentes do sistema, o que facilita a manutenção e o controle desses elementos. Outra iniciativa de destaque é a descentralização da geração de energia elétrica por meio do sistema Smart Grid (Kim 2019).

Diversas tecnologias são aplicadas no SEP, mas algumas se destacam por sua revolucionária contribuição. O HDVC, por exemplo, permite a transmissão de energia elétrica em corrente contínua e em alta tensão, possibilitando o transporte de energia a longas distâncias. Já o Smart Grid possibilita a geração de energia elétrica por pequenos consumidores, que é incorporada à rede de distribuição, criando um sistema inteligente de distribuição e transmissão (Patil; Kundu, 2021).

A adoção de tecnologias avançadas, como o HDVC e o Smart Grid, aliada à estruturação adequada do SEP, é essencial para garantir um sistema elétrico mais seguro, eficiente e resiliente, atendendo às demandas crescentes por energia elétrica de forma sustentável. Assim, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são cruciais para aprimorar a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, proporcionando benefícios tanto para as concessionárias quanto para os consumidores (Oliveira, 2023).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa permitiu uma análise detalhada das principais características do SEP, abordando aspectos como geração, transmissão e distribuição de energia. Além disso, foi possível explorar o impacto do aumento da demanda de energia e a necessidade de integração de fontes renováveis, destacando a importância do desenvolvimento de novas tecnologias para garantir a confiabilidade e eficiência do sistema.

No entanto, algumas limitações surgiram durante o desenvolvimento do estudo. A pesquisa se concentrou principalmente em uma revisão de literatura, o que limitou a abordagem de dados empíricos mais robustos sobre a implementação prática das tecnologias analisadas. Além disso, o estudo identificou que a incorporação de fontes renováveis no SEP, como a energia solar e eólica, traz desafios significativos para a estabilidade do sistema, que precisam ser mais investigados por meio de estudos técnicos e de campo. Tais desafios evidenciam a necessidade de mais pesquisas sobre soluções de armazenamento de energia e otimização da infraestrutura de transmissão.

Diante dessas limitações, recomenda-se que futuros estudos aprofundem a análise das tecnologias emergentes que podem ser aplicadas ao SEP, como sistemas avançados de monitoramento e controle, bem como soluções para melhorar a integração de fontes renováveis intermitentes.

Adicionalmente, pesquisas com uma abordagem prática, envolvendo estudos de caso e análises empíricas, podem contribuir para uma compreensão mais abrangente das melhorias necessárias no SEP. Esses estudos futuros serão fundamentais para garantir a resiliência do sistema elétrico diante das crescentes demandas e desafios tecnológicos.

REFERÊNCIAS

- ABRADEE. **Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/sistema-interligado>. Acesso em: 3 fev. 2024.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistemas de distribuição, 2017**.
- ALVES, Francisco Aldair. **Uma análise das smart grids aplicadas às microrredes inteligentes**, 2023. 76 f. TCC (Curso de graduação em Engenharia Elétrica) - Campus de Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2023.
- BARBOSA, Vitor Hugo Gialdi et al. **Comparação energética e econômica de três unidades fotovoltaicas operando em diferentes locais do estado de Mato Grosso do Sul**. 2022.
- CANTANE, Daniel Augusto; JUNIOR, Oswaldo Hideo Ando; HAMERSCHMIDT, Márcio Biehl. **Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro**. Editora Scienza, São Carlos-SP, Brasil, 2020.
- CONCEIÇÃO, Rafael Garcia et al. Transmissão de energia elétrica em ultra alta tensão: o Complexo Hidrelétrico Belo Monte. **Revista Eletrônica Teccen**, v. 9, n. 1, p. 66-74, 2016.
- DA COSTA, Caroline LV et al. Análise das Bases de dados do Sistema Elétrico Brasileiro: Estudo de caso dos sistemas isolados. **ANAIS DO II SEMINÁRIO INTERDISCIPLINAR DE ENERGIA**, p. 32, 2023.
- IER. – Institute for Energy Research: **Eletricidade e distribuição**, 2016. Disponível em: <http://www.ier.com/>. Acesso em: 30 fev. 2024.
- GOMES, Victor Lucas Rosa. **Análise de perdas em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG, Itumbiara, 44 p. 2024.
- KIM, Chan-Ki et al. **HVDC Transmission: Power Conversion Applications In Power Systems**. John Wiley & Sons, 2019. 435 p.



LINS, Felipe Henrique Ferreira; RODRIGUES, Sidney Aciole. Smart Grids Como Alternativa Para Combate Às Perdas Não Técnicas Na Distribuição De Energia Elétrica. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 9, n. 5, p. 788-799, 2023.

GALLOTTI, Verônica Dias Moreira. Redes de energia elétrica inteligentes (Smart Grids). **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e30010918322-e30010918322, 2021.

OLIVEIRA, Guilherme Ramalho de. **Análise da flexibilidade operativa do sistema elétrico brasileiro no contexto da integração de fontes renováveis prevista no plano decenal**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PATIL, Vinay C.; KUNDU, Sandip. Realizing robust, lightweight strong PUFs for securing smart grids. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 68, n. 1, p. 5-13, 2021.

PEREIRA JUNIOR, Amaro Olimpio et al. **Decomposição estrutural e desigualdade do consumo de energia no Brasil por classe de renda**. Texto para Discussão, 2023.

SILVEIRA, Vitor Rafael Morais. **Impacto da geração distribuída nas perdas técnicas do sistema de distribuição**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.



ENERGIA FOTOVOLTAICA E SUAS VANTAGENS PARA APLICAÇÕES

PHOTOVOLTAIC ENERGY AND ITS ADVANTAGES FOR APPLICATIONS

Victor Manoel de Sena Sales
Paulo José Pinto Souza

14

Resumo

A energia solar é uma alternativa sustentável para a produção de eletricidade, especialmente no Brasil, que possui altos níveis de radiação devido à sua localização próxima à linha do equador. A tecnologia fotovoltaica, observada pela primeira vez em 1893 por Alexandre Edmond Becquerel, converte a luz solar diretamente em eletricidade, sendo uma fonte limpa e renovável. Este trabalho utiliza uma metodologia qualitativa descritiva, baseada em revisão de literatura em artigos, livros e monografias de plataformas acadêmicas, com foco em publicações dos últimos 10 anos. A pesquisa visa entender o funcionamento e as vantagens da tecnologia fotovoltaica em termos de eficiência e custo-benefício, além de explorar suas aplicações em diversos setores e suas contribuições para a sustentabilidade energética. O estudo também aborda os desafios enfrentados pela tecnologia fotovoltaica, como a variabilidade na geração de energia e os altos custos iniciais, buscando identificar as melhores práticas para integrar a energia solar de forma eficiente. Ao final, a pesquisa propõe uma visão abrangente sobre como a energia solar fotovoltaica pode contribuir para o futuro do setor energético, com potencial de representar um terço da produção total de energia no mundo, e seu papel essencial na inovação e sustentabilidade energética.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Conversor. Geração fotovoltaica.

Abstract

Solar energy is a sustainable alternative for electricity production, especially in Brazil, which has high levels of radiation due to its location near the equator. Photovoltaic technology, first observed in 1893 by Alexandre Edmond Becquerel, converts sunlight directly into electricity, being a clean and renewable source. This work uses a descriptive qualitative methodology, based on a literature review in articles, books and monographs from academic platforms, focusing on publications from the last 10 years. The research aims to understand the functioning and advantages of photovoltaic technology in terms of efficiency and cost-benefit, in addition to exploring its applications in various sectors and its contributions to energy sustainability. The study also addresses the challenges faced by photovoltaic technology, such as variability in energy generation and high initial costs, seeking to identify best practices for integrating solar energy efficiently. In the end, the research proposes a comprehensive vision on how photovoltaic solar energy can contribute to the future of the energy sector, with the potential to represent a third of the total energy production in the world, and its essential role in energy innovation and sustainability.

Keywords: Photovoltaic energy. Converter. Photovoltaic generation.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é reconhecido mundialmente por sua abundante diversidade em recursos naturais, incluindo níveis significativos de radiação solar. Devido aos custos reduzidos e à abundância de energia solar, estudos sobre a viabilidade de sistemas fotovoltaicos e outras fontes renováveis no Brasil têm atraído investimentos e interesse da sociedade (Figueredo, 2023).

A localização do Brasil próximo à linha do equador favorece a radiação solar, tornando a energia solar uma fonte alternativa viável e sustentável para a produção de eletricidade, devido à constante renovação do sol. A energia solar pode ser usada de duas formas principais: fotovoltaica e fototérmica. A energia solar fotovoltaica é especialmente valorizada por sua capacidade de converter diretamente a energia solar em eletricidade, sendo uma fonte limpa e renovável, sem emissões indesejáveis (Canton, 2018).

A energia solar tem o potencial de representar um terço da produção total de energia elétrica no mundo. A energia solar fotovoltaica, observada pela primeira vez por Alexandre Edmond Becquerel em 1893, consiste na conversão de energia luminosa incidente em materiais semicondutores, oferecendo uma forma de geração limpa capaz de suprir as necessidades do planeta com várias vantagens sobre as formas tradicionais de geração de energia (Melo, 2018).

A importância das fontes renováveis de energia elétrica e do sistema de tecnologia limpa fotovoltaica e suas contribuições identificadas apontam o papel das entidades reguladoras no incentivo à energia limpa e renovável, como os sistemas de energia solar.

Além disso, a pesquisa visa contribuir para a sociedade e a comunidade científica na área de engenharia elétrica, através de estudos de viabilidade de fontes renováveis de energia elétrica e do sistema de tecnologia limpa fotovoltaica. Como a tecnologia fotovoltaica pode ser aprimorada para superar os desafios atuais, como a variabilidade na geração de energia e os custos iniciais elevados, e quais são as melhores práticas para integrar a energia solar de maneira eficiente em diversos setores, a fim de maximizar sua eficiência, custo-benefício e impacto sustentável a longo prazo?

O objetivo geral deste estudo é analisar o uso da radiação solar e da energia fotovoltaica, destacando suas vantagens para aplicações futuras. Especificamente, o estudo visa entender a tecnologia fotovoltaica, avaliar suas vantagens e potencial em termos de eficiência e custo-benefício, explorar suas aplicações em diferentes setores e identificar opções de sustentabilidade energética. A pesquisa busca, portanto, fornecer uma visão abrangente sobre como a energia fotovoltaica pode contribuir para a sustentabilidade e inovação no setor energético.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, *Scielo*, *Lilacs* e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.



Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área de manutenção produtiva total, como Melo (2018), Canton (2018), Figueredo (2023), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise.

2.2 Resultados e Discussão

A energia solar fotovoltaica é obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, processo conhecido como efeito fotovoltaico. Este fenômeno foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel, em 1839, quando notou a formação de uma diferença de potencial nas extremidades de um material semicondutor em resposta à absorção de luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental desse processo de conversão (Silva, 2020).

Inicialmente, o desenvolvimento dessa tecnologia foi impulsionado por empresas do setor de telecomunicações, que buscavam fontes de energia para sistemas instalados em locais remotos. O segundo fator que contribuiu para seu avanço foi a corrida espacial (Pinho; Galdinho, 2014).

Segundo Melo (2018), a célula solar tornou-se o meio mais adequado, devido ao seu baixo custo e peso, para fornecer a energia necessária para missões de longa duração no espaço. Além disso, a necessidade de alimentar satélites com energia também impulsionou o desenvolvimento das células solares.

A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres da energia solar fotovoltaica. No entanto, para que essa forma de conversão de energia se tornasse economicamente viável na época, seria necessário reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células solares em comparação às utilizadas nas missões espaciais (Melo, 2018).

A energia solar fotovoltaica é uma fonte renovável de energia obtida através da conversão da energia luminosa do sol em eletricidade. Esse processo ocorre por meio do efeito fotovoltaico em materiais semicondutores, como o silício com vários tipos de semicondutores utilizados para essa conversão, sendo os mais comuns o silício amorfo e o cristalino (Canton, 2018).

De acordo com Da Silva (2019), os sistemas de energia solar fotovoltaica podem operar de duas formas: isoladamente, para fornecer eletricidade em locais remotos e descentralizados, ou conectados à rede elétrica, permitindo a geração de energia em grande escala e o compartilhamento do excedente com a rede. Os painéis fotovoltaicos são compostos pela combinação de várias células fotovoltaicas, formando módulos, que, por sua vez, são organizados em painéis e geradores fotovoltaicos.

O Efeito Fotovoltaico ocorre em materiais chamados semicondutores, que têm a propriedade de conduzir eletricidade de forma mais eficiente do que isolantes, mas menos do que condutores. As células fotovoltaicas, responsáveis pela conversão da luz solar em eletricidade, são frequentemente fabricadas com silício, cujos átomos possuem quatro elétrons, formando uma estrutura cristalina (Secundes, 2015).

A energia solar direta pode ser utilizada em cinco categorias principais, de acordo com a tecnologia empregada: iluminação solar passiva e natural, aquecimento e refrigeração, geração elétrica fotovoltaica, geração elétrica indireta por concentradores solares térmicos, e produção de combustível químico solar. As duas aplicações mais importantes

são a energia solar térmica, que converte a radiação solar em calor utilizável por meio de coletores solares, e a energia solar fotovoltaica, que transforma diretamente a radiação solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico (Kaltmaier Junior, 2020).

O silício é encontrado na forma de areias e, através de um processo complexo, é transformado em cristais. No entanto, uma célula construída apenas com cristal puro não produzirá eletricidade, pois os elétrons se combinarão com as lacunas, não gerando corrente elétrica (Canton, 2018).

Segundo Da Silva (2019), para que ocorra a geração de corrente elétrica, é necessário criar um campo elétrico em ambas as zonas da célula. Isso é alcançado através do processo de dopagem, que consiste na combinação do silício com outros materiais. O Boro é um dopante utilizado para criar a zona P, na qual três elétrons do Boro se ligam com os quatro átomos vizinhos do silício, criando uma lacuna e gerando um campo elétrico.

O potencial dessa energia é incrivelmente superior a mais de 10.000 vezes o consumo anual de energia utilizado pela humanidade. Contudo, é importante ressaltar que a disponibilidade de energia solar não é constante ao longo do ano e varia de acordo com as estações (com mínimo no inverno e máximo no verão) e as condições climáticas locais (Annel, 2014).

Conforme Sachs (2015), no sistema de energia solar fotovoltaica, os painéis solares captam a radiação solar, gerando correntes elétricas que são convertidas em corrente alternada por inversores solares. A eletricidade gerada pode ser utilizada localmente, acumulada em forma de créditos de energia ou armazenada para uso.

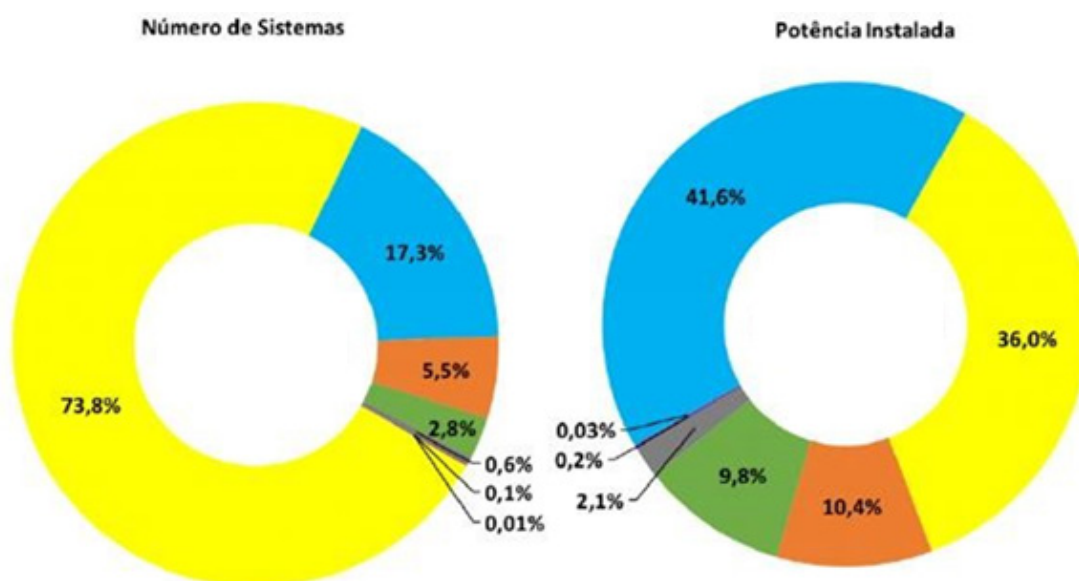


Figura 1. Geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo

Fonte: Portal Solar (2023).

Segundo dados da Absolar, o Brasil atualmente conta com 93.597 sistemas de energia solar fotovoltaica conectados à rede, resultado de investimentos acumulados que superaram R\$ 5,6 bilhões. Esse volume de recursos permitiu ao país alcançar um marco histórico de 1 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica. Esses sistemas estão presentes em uma ampla variedade de edifícios, como residências, comércios, indústrias, propriedades rurais, prédios públicos e pequenas propriedades (Portal Solar, 2019).

2.2.1 Composição de uma Central Fotovoltaica

Uma Central Fotovoltaica é composta por sistemas fotovoltaicos que, obrigatoriamente, estão ligados à rede elétrica e possuem uma capacidade instalada maior que 200 kWp. A potência dessa central é o que define o nível de tensão em que será conectada. A ANEEL estabelece os parâmetros que relacionam os diferentes níveis de tensão aos intervalos de potência, conforme mostrado na Tabela 1 (Figueredo, 2023).

Potência Instalada	Nível da Tensão de Conexão
200kW a 500kW	Baixa Tensão (Trifásica)/Média Tensão
501kW a 30MW	Média Tensão/Alta Tensão
> 30MW	Alta Tensão

Figura 2. Níveis de tensão de conexão para centrais fotovoltaicas
Fonte: Adaptado Secundes (2015).

No contexto de classificação dos sistemas fotovoltaicos, a ANEEL, por meio da Resolução Normativa Nº 482/2012, define atualmente duas categorias: sistemas de microgeração, com potência de até 100 kW, e sistemas de minigeração, cuja potência varia entre 100 kW e 1 MW. Com o crescimento e a maior popularização da geração distribuída, é provável que uma classificação mais detalhada seja estabelecida, levando em conta a capacidade de geração desses sistemas (Aneel, 2014).

Uma usina fotovoltaica é composta essencialmente por geradores fotovoltaicos e inversores de corrente. Desde a conversão da energia solar até sua entrega à rede elétrica, são necessários dispositivos adicionais, como cabeamento e transformadores de tensão (Silva, 2020).

De acordo com Melo (2018), a energia gerada em corrente contínua é transportada por cabos adequados até os inversores, que a convertem em corrente alternada. Em seguida, a corrente passa por transformadores, que elevam a tensão aos níveis necessários para integração com a rede elétrica da concessionária.

A associação em série permite alcançar a tensão desejada, enquanto a conexão em paralelo ajusta a corrente elétrica. A estrutura dos próprios módulos reflete essa lógica, visto que suas células fotovoltaicas também são organizadas para combinar tensão e corrente (Canton, 2018).

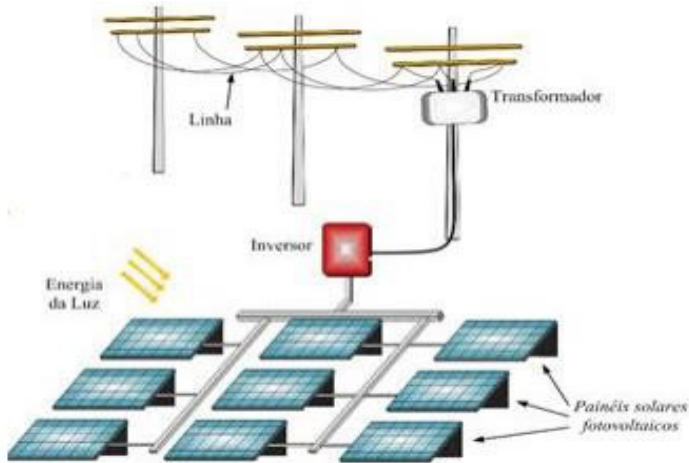


Figura 3. Composição básica de uma central fotovoltaica
Fonte: Adapto Secundes (2015).

Segundo Secundes (2015), cada célula fotovoltaica individual apresenta valores relativamente baixos de tensão e corrente. Assim, ao serem agrupadas, as células formam os módulos, que, por sua vez, compõem o gerador fotovoltaico. O comportamento desse gerador assemelha-se ao de um gerador de corrente contínua, o que exige a adequação do sistema para garantir uma operação eficiente e segura.

As características de tensão e corrente do gerador fotovoltaico não são constantes, pois dependem diretamente da irradiância solar captada pelos módulos e da temperatura de operação das células. A variação da irradiância e da temperatura afeta o desempenho, exigindo que o sistema seja projetado para otimizar a produção de energia com base nessas variáveis (Kaltmaier Junior, 2020).

De acordo Kaltmaier Junior (2020), os módulos fotovoltaicos possuem características elétricas impressas em sua estrutura física e detalhadas em seus catálogos (*data sheets*). A identificação principal de um módulo é feita com base em sua potência de pico, medida em watt-pico (Wp), que é determinada por testes realizados em Condições Padrão de Teste (STC).

Essas condições incluem uma irradiância solar de 1000W/m^2 , temperatura da célula de 25°C e uma massa de ar de AM1,5. No entanto, quando o módulo está sujeito a condições meteorológicas reais, a potência gerada pode diferir da potência de pico especificada, pois a geração de energia depende diretamente da irradiância solar e inversamente da temperatura da célula (Melo, 2018).

Além da potência nominal, outros parâmetros elétricos são importantes para caracterizar um módulo fotovoltaico. A Tensão de Circuito Aberto (V_{oc}) é a tensão medida quando o módulo não está conectado a nenhum dispositivo elétrico, enquanto a Corrente de Curto-Circuito (I_{sc}) é a corrente medida quando um amperímetro é conectado diretamente aos terminais do módulo (Sachs, 2015).

O Ponto de Máxima Potência (P_{mp}) representa o valor máximo obtido pela multiplicação da tensão e da corrente, identificável na curva característica I-V do módulo fotovoltaico. A Tensão de Máxima Potência (V_{mp}) e a Corrente de Máxima Potência (I_{mp}) correspondem à tensão e à corrente específicas no ponto de máxima potência (Sachs, 2015).

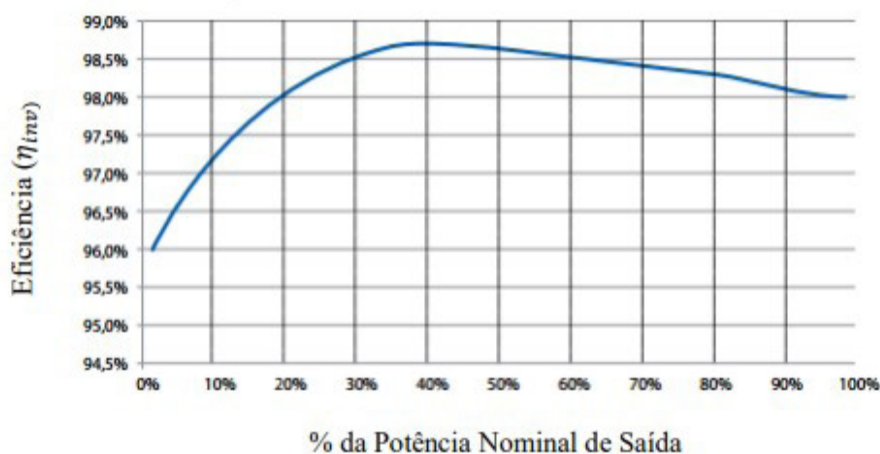


Figura 4. Curva de eficiência de um inverso

Fonte: Adapto Secundes (2015).

Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento e funcionamento eficaz dos sistemas fotovoltaicos, já que indicam o comportamento elétrico do módulo em diferentes condições. A curva que ilustra a relação entre corrente e tensão, é uma representação visual clara desses parâmetros e facilita o entendimento das variações no desem-

penho do módulo fotovoltaico (Figueredo, 2023).

Os coletores concentradores são utilizados para acionamento de turbinas a vapor, alcançando temperaturas entre 100 e 400°C. Por outro lado, os coletores planos são empregados em aplicações residenciais, pois atingem temperaturas mais baixas, cerca de 60°C (Pinho; Galdino, 2014). Dentro do coletor, quando exposto à radiação solar, o fluido é aquecido e se torna menos denso, subindo do coletor até o reservatório de forma termodinâmica.

De acordo Kaltmaier Junior (2020), os sistemas fotovoltaicos podem ser de geração independente ou conectados à rede elétrica das concessionárias. Os SFCRs (Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede) são basicamente constituídos por painéis fotovoltaicos e inversores, sem a necessidade de elementos para armazenar a energia, pois a rede elétrica da concessionária atua como um armazenador.

Para gerar energia elétrica a partir da energia solar, é necessário um processo de captação e conversão da radiação por meio de um kit de energia solar. Esse kit é composto por módulos fotovoltaicos, ou painéis solares, formados por células que absorvem a radiação solar, sendo o ponto inicial e principal do sistema (Secundes, 2015).

Após a captação dos raios solares e sua conversão em energia elétrica pelos módulos, a corrente gerada precisa ser transformada para que possa ser utilizada em aparelhos eletrônicos. O inversor de frequência é o componente responsável por converter a corrente contínua em corrente alternada, ajustando-a conforme a necessidade da edificação, seja 110 ou 220 volts (Kaltmaier Junior, 2020).

De acordo Kaltmaier Junior (2020), em sistemas *on-grid*, utiliza-se um medidor bidirecional que monitora o fluxo de energia em dois sentidos: da rede de distribuição para o imóvel e do sistema solar para a rede da distribuidora. Isso é necessário porque, quando a energia gerada pelo sistema não é consumida imediatamente, ela se torna excedente e é enviada para a rede elétrica, gerando créditos para o consumidor.

O *string box*, também conhecido como caixa de junção, é um dispositivo de segurança que protege os módulos fotovoltaicos contra falhas que possam comprometer o funcionamento das células. Ele age como um disjuntor, permitindo a reparação do sistema de forma segura. No entanto, esse equipamento é utilizado apenas em sistemas que operam com inversores comuns (Figueredo, 2023).

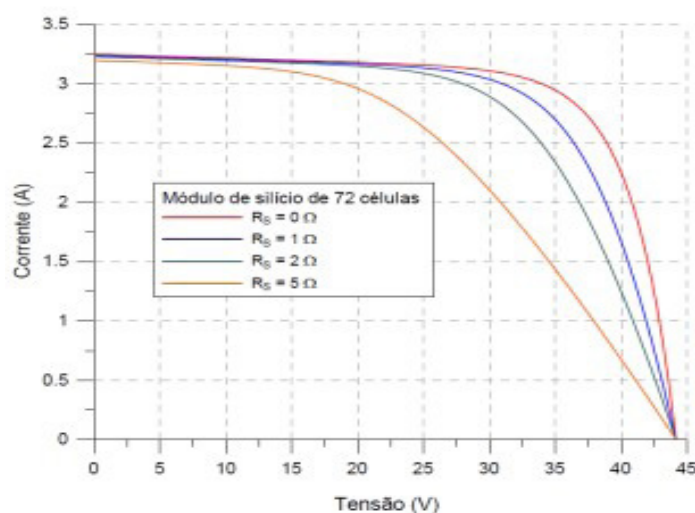


Figura 5. consumo Curvas características I-V de um módulo fotovoltaico de silício cristalino devido à variação da Resistência Série

Fonte: Adapto Figueredo (2023).

Segundo Da Silva (2020) o painel solar é capaz de gerar energia diretamente do sol, podendo ser utilizada para acender uma lâmpada ou acionar um motor sem a necessidade de um acumulador de energia, como uma bateria. No entanto, nos sistemas de energização residencial, é essencial utilizar baterias para armazenar a energia produzida durante o dia.

Dessa forma, a energia acumulada pode ser usada durante a noite ou em períodos de mau tempo, garantindo um suprimento contínuo e constante de energia, independentemente das variações de insolação (Silva, 2020). As baterias são elementos fundamentais para o armazenamento da energia solar, permitindo que os consumidores tenham acesso à energia mesmo quando não há luz solar disponível. Isso assegura o funcionamento contínuo dos equipamentos instalados e maximiza a eficiência do uso da energia solar em sistemas residenciais (Canton, 2018).

A tecnologia fotovoltaica baseia-se no “efeito fotovoltaico”, que é a capacidade de certos materiais semicondutores tratados adequadamente gerarem eletricidade quando expostos à radiação luminosa. Isso ocorre quando a energia da luz é suficiente para que elétrons, presentes na banda de valência de um material semicondutor, passem para a banda de condução (Silva, 2020).

Além disso, outros fatores como condições padrão de medida, condições nominais de operação, eficiência do módulo e concentradores fotovoltaicos também afetam o funcionamento desses sistemas (Portal Solar, 2023). Um sistema fotovoltaico é composto por diversos componentes interligados que trabalham em conjunto para converter a energia solar em eletricidade utilizável. Os painéis fotovoltaicos, posicionados de forma a capturar a luz solar, são responsáveis por transformar a radiação solar em corrente contínua (DC) (Portal Solar, 2023).

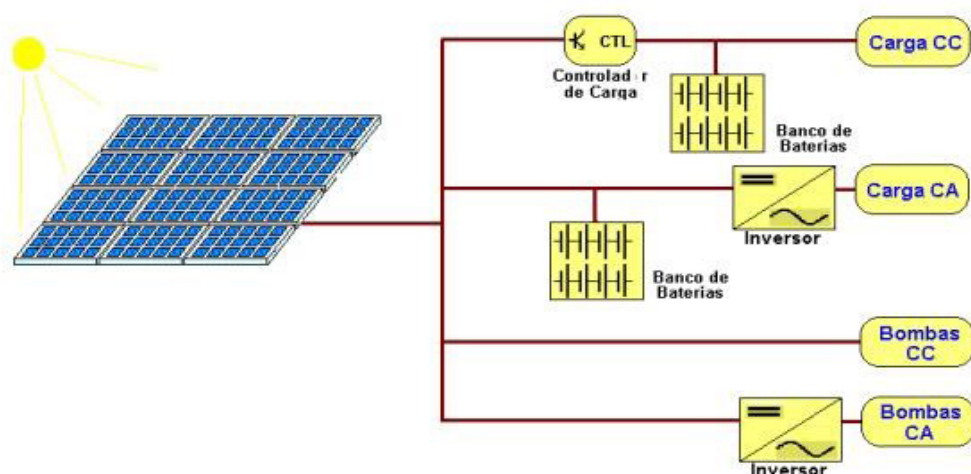


Figura 6. Diagrama de sistemas fotovoltaicos em função da carga utilizada.

Fonte: Adapto Figueiredo (2023).

Essa eletricidade gerada é então direcionada para o controlador de carga, que tem a função de regular a energia que é armazenada nas baterias, além de proteger o sistema contra possíveis sobrecargas ou descargas excessivas que podem comprometer a eficiência e a durabilidade do sistema (Pinho; Galdino, 2014).

As baterias desempenham um papel crucial ao armazenar a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, possibilitando o uso da eletricidade mesmo quando a luz solar não está disponível, como durante a noite ou em dias nublados. A capacidade e a tensão das baterias são importantes para garantir que a energia armazenada atenda às necessidades

da carga conectada (Portal Solar, 2023).

Após o armazenamento, a corrente contínua das baterias precisa ser convertida em corrente alternada (AC) para ser compatível com a maioria dos dispositivos e eletrodomésticos. Isso é realizado pelo inversor, que deve ter especificações adequadas à potência necessária e à eficiência do sistema (Portal Solar, 2023).

A carga representa os dispositivos ou equipamentos que consomem a eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico. O dimensionamento adequado dos componentes do sistema, incluindo painéis, controlador de carga, baterias e inversor, é essencial para assegurar que a energia produzida seja suficiente para atender à demanda da carga (Pinho; Galdino, 2014).

De acordo Kaltmaier Junior (2020), a energia solar fotovoltaica apresenta diversas aplicações no campo das energias renováveis. É viável utilizá-la em praticamente todo o território, sendo especialmente benéfica em áreas afastadas dos centros de produção energética, onde ajuda a reduzir a demanda energética e, conseqüentemente, a perda de energia durante a transmissão.

A tecnologia fotovoltaica tem avançado significativamente nos últimos anos, mas ainda enfrenta desafios como a variabilidade na geração de energia e os altos custos iniciais. Para superar esses desafios e melhorar a eficiência, várias abordagens e inovações estão sendo exploradas (Pinho; Galdino, 2014).

Primeiramente, a variabilidade na geração de energia solar pode ser mitigada por meio do aprimoramento das tecnologias de armazenamento de energia. Baterias com maior capacidade e eficiência, como as de íon de lítio ou soluções emergentes como baterias de fluxo, são essenciais para armazenar a energia gerada durante períodos de alta produção e liberá-la quando a produção é baixa, garantindo um fornecimento mais constante (Sachs, 2015).

Além disso, o desenvolvimento de técnicas avançadas de previsão meteorológica e sistemas de gerenciamento inteligente de energia podem otimizar o uso da energia solar, ajustando a operação das instalações em resposta às condições climáticas e à demanda.

Quanto aos custos iniciais elevados, uma combinação de estratégias pode ajudar a torná-los mais acessíveis. O avanço nas tecnologias de fabricação de células solares e a produção em maior escala têm contribuído para a redução dos custos dos painéis fotovoltaicos. Incentivos governamentais e políticas de subsídio também desempenham um papel crucial na redução do custo inicial (Sachs, 2015).

Segundo Figueredo (2023), os modelos de financiamento inovadores, como leasing solar e contratos de compra de energia (PPA), permitem que os usuários finais instalem sistemas fotovoltaicos com custos iniciais reduzidos ou até mesmo sem custos, pagando pelo uso da energia gerada ao longo do tempo.

Para integrar a energia solar de maneira eficiente em diversos setores, é fundamental adotar práticas que maximizem a eficiência e o impacto sustentável. A integração de sistemas fotovoltaicos em projetos de construção sustentável, como edifícios com telhados solares e sistemas de energia solar integrada, pode otimizar o uso da energia solar em ambientes urbanos (Sachs, 2015).

Em áreas rurais, a combinação de energia solar com outras formas de geração de energia renovável, como eólica ou biomassa, pode criar sistemas híbridos que aproveitam as melhores características de cada fonte. Finalmente, a implementação de políticas públicas que promovam a energia solar, o incentivo à pesquisa e desenvolvimento de novas

tecnologias, e a educação sobre os benefícios da energia solar são essenciais para maximizar a eficiência, o custo-benefício e o impacto sustentável a longo prazo (Melo, 2018).

Portanto, a tecnologia fotovoltaica e a energia solar fotovoltaica desempenham um papel importante no contexto das energias renováveis e na busca por soluções sustentáveis para suprir as necessidades energéticas da sociedade. Seu uso eficiente e crescente contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a construção de um futuro mais limpo e ambientalmente responsável (Canton, 2018).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos foram alcançados, proporcionando uma compreensão abrangente da tecnologia fotovoltaica, suas vantagens em termos de eficiência e custo-benefício, e suas diversas aplicações no setor energético. A pesquisa confirmou que a energia solar pode contribuir significativamente para a sustentabilidade, destacando-se como uma alternativa viável e necessária diante dos desafios energéticos globais.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas durante o desenvolvimento do trabalho. A revisão de literatura, embora abrangente, não conseguiu incluir todas as inovações tecnológicas mais recentes devido à restrição temporal e à disponibilidade de dados.

Além disso, a variabilidade na geração de energia solar e os custos iniciais elevados permaneceram como barreiras significativas à adoção em larga escala, o que requer uma análise mais aprofundada em estudos futuros. As recomendações incluem a necessidade de um mapeamento mais detalhado das melhores práticas de integração da energia solar, além da promoção de políticas públicas que incentivem investimentos em tecnologia e infraestrutura para a expansão da energia fotovoltaica no Brasil.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos empíricos que investiguem a aplicação da tecnologia fotovoltaica em diferentes contextos, como comunidades rurais e áreas urbanas de baixo poder aquisitivo. Além disso, a análise das políticas de incentivo fiscal e subsídios para sistemas de energia solar pode oferecer insights valiosos sobre como superar as barreiras existentes e fomentar a adoção de fontes de energia renovável.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Relatório Aneel 2012. 2014.

CANTON, N. V. **Análise de Eficiência Energética de uma Residência Usando**

Estratégias de Arquitetura Passiva e Energia Solar. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

DA SILVA, G. F. ET AL. **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. Aracaju, API. 316p., 2019.

FIGUEIREDO, Aline Rodrigues de. **Energia Solar: captação e aproveitamento pela Arquitetura**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

KALTMAYER JUNIOR, Günther, **Análise de um sistema de fachada termo fotovoltaico Integrado à arquitetura – estudo de caso na cidade de Curitiba**,

Brasil. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGECC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

KLEINBACH, M.; HINRICHS, R. A.; REIS, L. **Energia e Meio Ambiente**. Editora: Cengage Learning, 2015.



MELO, Otavio Augusto Malheiros Honorio de. **Análise da viabilidade econômico-financeira da energia fotovoltaica:** uma aplicação da microgeração distribuída no Nordeste brasileiro. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

PINHO, J.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

PORTAL SOLAR. **Painel solar: preços e custos de instalação.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.portal-solar.com.br/painel-solar-precos-custos-deinstalacao.html>. Acesso em: 19 ago. 2024.

SACHS, Ignacy. **Estratégias de transição para o Século XXI:** desenvolvimento e meio ambiente e energia renovável. São Paulo, SP: Studio Nobel: Fundação do desenvolvimento administrativo, 2015.

SECUNDES, Urbano Uellington. **Procedimentos e normativas para instalação de centrais fotovoltaicas conectadas à rede elétrica em média tensão.** 2015. Dissertação de Mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

SILVA, Jonatas Rodrigues. **Uma sequência de ensino investigativa para a abordagem do efeito fotovoltaico.** 2020.



ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO DA LITERATURA

PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY: A LITERATURE REVIEW

Raunyr Luigi Santos Silva

15

Resumo

Este estudo aborda a relevância do uso da energia solar fotovoltaica, destacando o efeito fotovoltaico como mecanismo de conversão da radiação solar em eletricidade. Diante do cenário de crescente demanda por fontes renováveis e a necessidade de mitigar os danos ambientais causados pelo uso excessivo de recursos não renováveis, a energia solar surge como uma alternativa sustentável e viável para a diversificação da matriz energética. No Brasil, que possui uma posição geográfica favorável para a captação de energia solar, os sistemas fotovoltaicos representam uma solução promissora, tanto para o consumo residencial quanto industrial. A metodologia utilizada consistiu em uma revisão de literatura descritiva, baseada em fontes acadêmicas, como artigos e livros, disponíveis em plataformas como Google Acadêmico, Scielo e Lilacs. Esta abordagem permitiu a síntese de informações sobre a aplicação da energia solar fotovoltaica e sua contribuição para o setor energético, especialmente no contexto brasileiro. Como resultado, o estudo oferece uma visão aprofundada dos desafios e benefícios da adoção da energia fotovoltaica, destacando sua importância para a sustentabilidade e a diversificação da matriz elétrica. Conclui-se que, apesar dos avanços tecnológicos, ainda há barreiras significativas para sua integração em larga escala, o que abre oportunidades para pesquisas e inovações futuras no setor.

Palavras-chave. Energia solar. semicondutores. Radiação solar. Renovável.

Abstract

This study addresses the relevance of using photovoltaic solar energy, highlighting the photovoltaic effect as a mechanism for converting solar radiation into electricity. Given the scenario of growing demand for renewable sources and the need to mitigate environmental damage caused by the excessive use of non-renewable resources, solar energy emerges as a sustainable and viable alternative for diversifying the energy matrix. In Brazil, which has a favorable geographic position for capturing solar energy, photovoltaic systems represent a promising solution for both residential and industrial consumption. The methodology used consisted of a descriptive literature review, based on academic sources, such as articles and books, available on platforms such as Google Scholar, Scielo and Lilacs. This approach allowed the synthesis of information on the application of photovoltaic solar energy and its contribution to the energy sector, especially in the Brazilian context. As a result, the study offers an in-depth view of the challenges and benefits of adopting photovoltaic energy, highlighting its importance for the sustainability and diversification of the electricity matrix. It is concluded that, despite technological advances, there are still significant barriers to its large-scale integration, which opens up opportunities for future research and innovation in the sector.

Keywords: Solar energy. Semiconductors. Solar radiation. Renewable.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão da radiação solar em eletricidade, utilizando materiais semicondutores como intermediários, em um fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Nos últimos anos, o uso da energia solar para geração elétrica tem ganhado destaque no mercado brasileiro, especialmente para suprir o consumo industrial, residencial e de edifícios com desafios energéticos (Machado; Mirando, 2014).

No entanto, surgem desafios dentro desse contexto. O Brasil, dotado de abundantes recursos naturais e uma posição geográfica privilegiada para a captação de energia solar, também possui capital humano capacitado para atuar na indústria de energia solar fotovoltaica. Apesar dos notáveis esforços, persistem obstáculos que dificultam a integração em larga escala da energia fotovoltaica na matriz elétrica nacional (Freitas, 2021).

A importância desse tema torna-se inegável diante da crescente demanda por fontes de energia renovável, sendo crucial também para mitigar os riscos associados ao esgotamento de recursos naturais e os danos irreversíveis ao meio ambiente. Esse aspecto, embora ameaçador devido ao potencial devastador, age como um incentivo para a exploração de alternativas de produção de energia que reduzam cada vez mais a agressão ao ecossistema (Pinto *et al.*, 2015).

Esta temática assume relevância dada a crescente demanda por fontes energéticas renováveis, numa busca por evitar a degradação ambiental resultante do consumo excessivo de recursos não renováveis. A conversão de energia solar em energia elétrica a partir do princípio do elemento fotovoltaico é uma das formas mais promissoras de energia alternativa. Diante desse contexto nasce uma problemática a ser analisada: Qual a importância da energia fotovoltaica para a matriz energética nacional?

O objetivo geral deste estudo é analisar a relevância do emprego da energia proveniente da radiação solar por meio de sistemas fotovoltaicos para a geração de eletricidade. De maneira específica, busca-se elucidar os conceitos essenciais associados à produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. A pesquisa visa, portanto, oferecer uma compreensão aprofundada sobre os processos e benefícios ligados a essa tecnologia sustentável, destacando sua contribuição para a diversificação da matriz energética.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilita a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras. Na pesquisa será realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzam a obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para busca compreenderá os últimos 10 anos. As palavras chaves: Energia. Renovável. Sustentável.



2.2 Resultado e Discussão

A eletricidade teve sua primeira aplicação prática no âmbito das comunicações, sendo inicialmente empregada no funcionamento de dispositivos como o telégrafo e o telefone elétrico. Contudo, um marco de relevância ocorreu em 1882, quando Thomas Edison estabeleceu as primeiras usinas geradoras de corrente contínua. Essas usinas tinham por objetivo fornecer energia para sistemas de iluminação (Melo, 2021).

O ponto de inflexão para a eletrificação em grande escala ocorreu em 1886, quando George Westinghouse realizou a pioneira transmissão de energia elétrica em corrente alternada. Esse feito assinalou a ascensão da corrente alternada como alternativa viável para a transmissão de energia elétrica em longas distâncias. Nesse contexto, Nikola Tesla desempenhou um papel crucial ao conceber sistemas polifásicos fundamentados na corrente alternada, enquanto William Stanley contribuiu para aprimorar a eficiência dos transformadores (Pereira *et al.*, 2017).

O desenvolvimento da energia fotovoltaica ao longo do tempo tem suas raízes no século XIX, quando o físico francês Alexandre-Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico em 1839. No entanto, o progresso significativo ocorreu no século XX. Na década de 1950, cientistas da Bell Labs criaram a primeira célula solar de silício com uma eficiência de conversão de 6%, marcando o início da era moderna da energia fotovoltaica (Pinto *et al.*, 2015).

Na década de 2010, os custos de instalação de painéis solares diminuíram significativamente, tornando a tecnologia mais acessível. A energia solar fotovoltaica experimentou um crescimento notável em todo o mundo, contribuindo para a diversificação das fontes de energia (Machado; Mirando, 2014).

De acordo com Woruby, (2018), o conceito de energia apresenta diversas definições, cada uma com características distintas, adequadas a abordagens específicas. Neste trabalho, centrado na geração de energia elétrica, a definição adotada está direcionada por essa temática.

Sua geração pode ocorrer por meio de fontes renováveis, como a força de águas, ventos, energia solar e biomassa, ou por fontes não-renováveis, como combustíveis fósseis e nucleares. No contexto brasileiro, onde há uma grande quantidade de rios, a opção hidráulica é amplamente utilizada, sendo apenas uma pequena parte proveniente de combustíveis fósseis em usinas termelétricas (Woruby, 2018).

As energias renováveis são aquelas cuja taxa de utilização é inferior à taxa de renovação. Elas fazem uso de recursos naturais considerados inesgotáveis devido à capacidade de regeneração, tais como energia geotérmica, energia das marés, energia solar, energia eólica, energia hidráulica e energia oceânica. Além disso, resíduos agrícolas, urbanos e industriais também são considerados fontes renováveis de energia (Freitas, 2021).

Essas fontes renováveis surgem como uma alternativa ou complemento às fontes de energia convencionais. Originam-se de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda a energia disponível na Terra. Por essa razão, são praticamente inesgotáveis e não afetam o equilíbrio térmico do planeta, caracterizando-as como fontes não convencionais de energia (Freitas, 2021).

2.2.1 Princípio de Funcionamento da Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é uma forma de geração de energia elétrica a partir da

conversão direta da luz solar em eletricidade usando células fotovoltaicas. Essa tecnologia tem se destacado como uma alternativa sustentável e renovável às fontes de energia convencionais, devido aos seus benefícios ambientais e potencial de produção de energia limpa (Araújo; Rank; Bueno, 2016).

De acordo com Melo (2021), uma variedade de materiais semicondutores é apropriada para a conversão fotovoltaica, destacando-se o silício cristalino e o silício amorfo hidrogenado, que são amplamente utilizados na prática. A energia solar fotovoltaica é considerada uma tecnologia promissora devido ao seu processo de geração sustentável, que não envolve a emissão de poluentes ou gases de efeito estufa.



Figura 1. Célula fotovoltaica Exemplo de Painel Fotovoltaico

Fonte: Freitas (2021)

Segundo Machado e Mirando (2014), a energia solar é derivada da radiação solar e pode ser aproveitada por meio de diversas tecnologias que continuam a evoluir constantemente. Entre essas tecnologias, destacam-se o aquecimento solar, a energia solar fotovoltaica e a fotossíntese artificial.

Essas abordagens podem ser classificadas como ativas ou passivas, exemplificadas pelo uso de painéis fotovoltaicos e coletores solares térmicos para captação ativa da energia solar. Abordagens passivas envolvem a seleção de materiais, como massas térmicas apropriadas ou características translúcidas, para facilitar a circulação natural da energia solar (Machado; Mirando, 2014).

As células fotovoltaicas são o coração da energia solar fotovoltaica. Essas células são feitas de materiais semicondutores, geralmente à base de silício, que têm a capacidade de gerar corrente elétrica quando expostos à luz solar. Quando fótons (partículas de luz) atingem a superfície da célula, eles liberam elétrons dos átomos do material semicondutor, criando uma corrente elétrica (Melo, 2021).

As células fotovoltaicas são feitas de materiais semicondutores, geralmente à base de silício. Quando a luz solar incide sobre esses materiais, fótons (partículas de luz) colidem com os átomos do semicondutor, transferindo energia para os elétrons presentes nos átomos. A energia dos fótons absorvidos pelos átomos do material semicondutor permite que elétrons sejam liberados de seus níveis de energia normais (Domingos, 2014).

As células fotovoltaicas são projetadas de maneira que os elétrons liberados pelas colisões com os fótons se movam em uma direção preferencial devido à configuração interna da célula. Essa movimentação de elétrons resulta em uma corrente elétrica. A maioria das células fotovoltaicas é construída com uma junção PN, onde uma camada do material

é dopada (alterada quimicamente) para ter excesso de elétrons (tipo N) e a outra camada é dopada para ter lacunas (tipo P) (Albuquerque, 2020).

Segundo Albuquerque (2020), essa parcela da energia solar disponível para utilização é apenas uma fração mínima. O espectro de luz solar presente na superfície terrestre é composto principalmente pela gama visível e infravermelha, juntamente com uma pequena porção de radiação ultravioleta.

A absorção da energia solar ocorre na superfície terrestre, nos oceanos e na atmosfera, o que resulta no aumento da temperatura. O ar aquecido, carregando vapor d'água evaporado dos oceanos, induz a convecção e circulação atmosférica. Quando o ar atinge altitudes mais elevadas, resfria e o vapor d'água condensa, formando nuvens que posteriormente originam a precipitação sobre a superfície terrestre, completando o ciclo da água. O calor liberado durante a condensação da água contribui para a formação de ventos e ciclones (Silva, 2015).

A descoberta do efeito fotovoltaico é atribuída a Edmond Becquerel, em 1839, quando ele identificou o surgimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica, causada pela absorção de luz. Em 1876, foi desenvolvido o primeiro dispositivo fotovoltaico, resultado de estudos sobre a física do estado sólido. A produção industrial teve início somente em 1956, seguindo o crescimento do setor eletrônico (Machado, 2014).

Sua expansão no mercado global foi impulsionada pelo uso em aplicações aeroespaciais, militares e, posteriormente, na geração de eletricidade, tanto em sistemas distribuídos quanto em usinas de grande porte. Os módulos fotovoltaicos são compostos por células fotovoltaicas, como ilustrado na figura, e a conversão da radiação solar em energia elétrica é realizada por meio de semicondutores presentes nas células solares (Silva, 2015).

O processo de transformação de material semicondutor em uma célula fotovoltaica, conforme mencionado por Ambiente Brasil (2019), envolve uma etapa de purificação seguida por dopagem. A dopagem, realizada através da introdução controlada de elementos químicos como boro e fósforo, resulta na formação da junção p-n.

O efeito fotovoltaico é um fenômeno físico descoberto por Edmond Becquerel em 1839, quando observou uma tensão elétrica gerada pela ação da luz sobre um eletrodo metálico imerso em uma solução química. Esse efeito ocorre quando a radiação solar incide sobre uma célula composta por materiais semicondutores, chamados atualmente de células fotovoltaicas. Esses dispositivos são fundamentais para a conversão direta da energia luminosa em energia elétrica (Villalva, 2015).

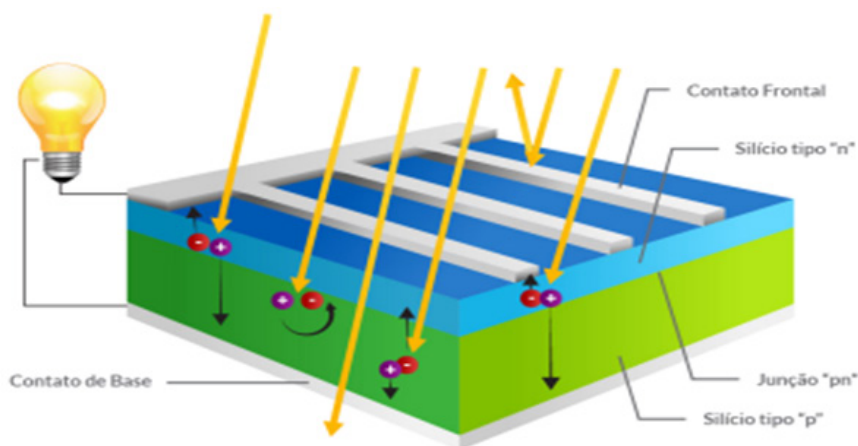


Figura 2. Célula fotovoltaica

Fonte: Freitas (2021)

sua abundância na natureza. Quando o Silício é dopado com Fósforo, torna-se um semicondutor tipo N, caracterizado por possuir um elétron extra em sua camada de valência, que pode ser facilmente liberado com uma pequena quantidade de energia. Por outro lado, ao ser dopado com Boro, o Silício se transforma em um semicondutor tipo P, com a ausência de um elétron em sua estrutura, formando as chamadas lacunas (Freitas, 2021).

Segundo Freitas (2021), a união de uma camada espessa de Silício tipo P com uma camada fina de Silício tipo N resulta em uma junção PN, onde há uma migração inicial de elétrons da região N para a P até que o equilíbrio seja alcançado. Quando essa junção é exposta à radiação eletromagnética, os fótons presentes na luz solar são absorvidos, liberando elétrons e permitindo o movimento deles através da junção, o que cria um campo elétrico dentro da célula.

Segundo Pereira et al. (2017), esse movimento de elétrons gera uma diferença de potencial entre os terminais da célula fotovoltaica, resultando na produção de eletricidade. Assim, a célula fotovoltaica funciona como um gerador de energia elétrica a partir da luz solar, sendo uma tecnologia essencial para o aproveitamento da energia renovável e limpa, com amplo potencial de aplicação em diversas áreas.

2.2.2 Elementos que Compõem um Sistema Solar Fotovoltaico On-Grid

De acordo com Freitas (2021), os módulos fotovoltaicos são comercializados com um valor nominal em Wp (watt-pico), o qual indica a sua potência de geração quando submetidos a uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura de 25°C . Esses parâmetros são obtidos em testes laboratoriais, conduzidos sob Condições de Teste Padronizadas (STC - *Standard Test Conditions*).



Figura 3. Módulos fotovoltaicos

Fonte: Freitas (2021)

Os módulos fotovoltaicos, conhecidos na literatura e no mercado como painéis fotovoltaicos ou placas fotovoltaicas, são compostos por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série e paralelo. Essas associações são feitas de modo a resultar em tensões e correntes adequadas para uso em instalações e comercialização (Vilalva, 2015).

Segundo Freitas (2021), os módulos fotovoltaicos com células policristalinas, que possuem um processo de fabricação mais econômico, apresentam uma eficiência de até 18,15%. Já os módulos com células monocristalinas possuem eficiência de até 20,6%, o que permite a fabricação de módulos com maior potência, sem alterar suas dimensões.

O inversor é um equipamento eletrônico cuja principal função é converter as grandezas de tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos (FV), que são em corrente contínua, para corrente alternada. Além disso, em sistemas on-grid, ele também sincroniza o ângulo

de fase e a frequência com a rede de distribuição de energia elétrica (Freitas, 2021).

Conforme mencionado por Villalva (2015), os inversores modernos contam com a tecnologia de Seguidor do Ponto Máximo de Potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracker*), que permite ao módulo FV operar sempre em seu ponto máximo de potência. Nos casos de múltiplas entradas MPPT, é possível organizar os módulos de forma a minimizar os efeitos do sombreamento, garantindo maior eficiência na geração de energia.

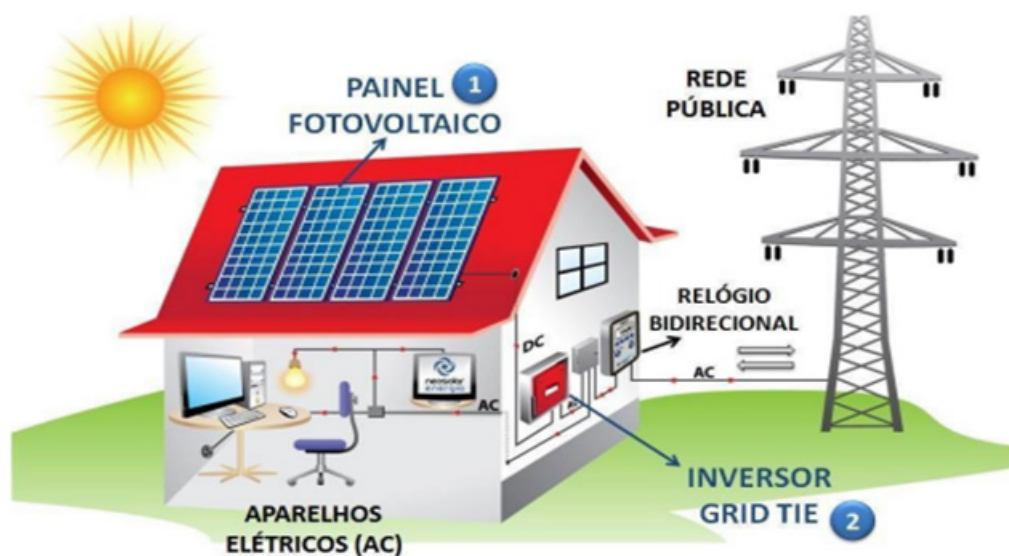


Figura 4. Exemplo Inversor Grid Tie

Fonte: Freitas (2021)

Os sistemas fotovoltaicos autônomos (Off-Grid) são amplamente utilizados em locais onde não há cobertura da rede elétrica convencional, como em zonas rurais, comunidades isoladas ou áreas de difícil acesso, conforme Villalva (2015). Esses sistemas possibilitam a geração de energia de forma independente, garantindo eletricidade em regiões onde a infraestrutura de distribuição não está presente.

De acordo com Villalva (2015), um sistema pode conter um ou mais inversores, dependendo da potência nominal e das necessidades específicas do sistema. Esses fatores podem incluir o sombreamento, os diferentes locais de instalação com variação nos ângulos de inclinação e azimutais, bem como as distâncias físicas entre os grupos de painéis instalados.

De acordo com Pereira et al. (2017), na seleção de um inversor, é essencial observar se ele é monofásico, bifásico ou trifásico, sua potência nominal, as tensões e correntes de entrada em corrente contínua (CC), as tensões e correntes de saída em corrente alternada (CA), além da faixa de frequência de saída.

Geralmente, os sistemas autônomos necessitam de um elemento armazenador de energia, como um banco de baterias. Esse componente é responsável por armazenar a energia gerada durante o dia, quando há incidência de radiação solar, para ser utilizada à noite (Melo, 2021).

Além das baterias, é fundamental a instalação de um controlador de carga, que desempenha o papel de equilibrar o uso da energia gerada e otimizar a vida útil do sistema de armazenamento. De acordo com Araújo, Rank e Bueno (2016), o controlador de carga garante um melhor gerenciamento da energia, evitando sobrecargas e garantindo maior durabilidade ao banco de baterias.

2.2.3 Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

O Brasil desfruta de alta radiação solar, especialmente na região Nordeste, como apontado por Freitas (2021), o que lhe confere uma vantagem significativa em relação a outros países industrializados no aproveitamento da energia solar fotovoltaica. O país destaca-se na América do Sul pelo desenvolvimento de energias renováveis e, notavelmente, foi pioneiro na fabricação comercial de células fotovoltaicas a partir de silício monocristalino, indo além da simples montagem de painéis solares.

No Brasil, mais de 70% da energia é proveniente de hidrelétricas, mas a construção dessas usinas causa impactos ambientais significativos. A emissão de gases do efeito estufa, a liberação de metano e os impactos nos ecossistemas aquáticos são questões problemáticas associadas às usinas hidrelétricas (Araújo; Rank; Bueno, 2016).

A energia solar é uma fonte de energia renovável, pois o sol é uma fonte praticamente inesgotável de radiação. Enquanto o sol continuar a brilhar, teremos acesso a essa energia. A rentabilidade de um sistema solar fotovoltaico é determinada pela produtividade da instalação, área e exposição solar, além do custo inicial. Diversos fatores influenciam a rentabilidade, incluindo as condições de implantação dos painéis solares e sua qualidade (Pinto *et al.*, 2015).

A instalação de sistemas solares fotovoltaicos em residências, empresas e instalações industriais pode resultar em redução significativa nas contas de energia elétrica ao longo do tempo. Isso é especialmente valioso em um cenário de aumento contínuo dos preços da eletricidade (Woruby, 2018).

A energia solar pode ser combinada com sistemas de armazenamento de energia, como baterias, para que o excesso de energia gerado durante o dia seja armazenado e utilizado à noite ou em momentos de pouca luz solar. Isso melhora a confiabilidade do sistema e permite maior independência da rede elétrica (Silva, 2015).

A diversificação da matriz energética emerge como uma constante, impulsionada não apenas pelos recursos disponíveis, mas também pela vastidão territorial, fatores que propiciam amplas possibilidades e oportunidades para diversas formas de obtenção de energia limpa e renovável. Tais premissas encontram respaldo na Resolução Normativa Nº 482, datada de 17 de abril de 2012, que regulamenta a geração de energia por meio de placas solares fotovoltaicas (ANEEL, 2018).

O sistema elétrico brasileiro, predominantemente hidrotérmico, é majoritariamente composto por usinas hidroelétricas, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 160 GW, somando as contribuições das diversas fontes de energia, conforme demonstrado no gráfico 3 baseado no BIG - Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2018).

De acordo com dados da ONS, em 2015, apenas 1,7% da demanda total de energia elétrica do país era suprida por sistemas isolados, localizados principalmente na região norte, caracterizados por sua distribuição equidistante (ONS, 2015). No que tange às perdas no SIN, atualmente, estima-se em torno de 15%, com projeções de redução para 14% até o ano de 2050.

Diante da importância da sustentabilidade e do crescente aumento na demanda por energia elétrica, torna-se fundamental a diversificação das fontes energéticas no Brasil, priorizando aquelas de baixo impacto ambiental. As projeções do Ministério de Minas e Energia indicam um crescimento de cerca de 200% na demanda por eletricidade nas próximas três décadas, com base no consumo histórico (MME, 2016).

Em relação à energia fotovoltaica, dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2017)



revelam que, no final de 2016, o Brasil possuía aproximadamente 81 MW instalados, representando 0,05% da matriz elétrica do país. Desse total, 24 MW correspondiam à geração centralizada, enquanto 57 MW eram provenientes da geração distribuída.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na conclusão deste estudo, verificou-se que os objetivos propostos foram, em grande parte, alcançados. O trabalho buscou analisar a relevância da energia solar fotovoltaica, apresentando de maneira clara os conceitos fundamentais associados à geração de eletricidade por meio dessa tecnologia. A pesquisa forneceu uma visão abrangente sobre os benefícios e desafios da implementação de sistemas fotovoltaicos, com ênfase na sua contribuição para a diversificação da matriz energética e para a sustentabilidade ambiental.

Em relação ao problema de pesquisa, foi possível identificar que, apesar dos avanços tecnológicos e do potencial geográfico do Brasil para a energia solar, ainda existem barreiras significativas para a plena integração dessa fonte na matriz elétrica nacional. Essas barreiras incluem altos custos iniciais, desafios regulatórios e limitações na infraestrutura de transmissão de energia.

As principais limitações do estudo incluem a dependência de fontes bibliográficas e a ausência de dados empíricos sobre a aplicação da tecnologia em diferentes regiões do país. Recomenda-se, em futuras pesquisas, a realização de estudos de caso práticos e a análise comparativa de diferentes modelos de implementação de energia fotovoltaica em áreas urbanas e rurais.

Por fim, trabalhos futuros podem explorar novas tecnologias de armazenamento de energia, como baterias mais eficientes, além de políticas públicas que incentivem a adoção de energia solar, de forma a superar as barreiras identificadas e promover o crescimento sustentável dessa fonte renovável.

REFERÊNCIAS

- AMBIENTE BRASIL. **Histórico das Células Fotovoltaicas e a Evolução da Utilização de Energia Solar**. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª edição, Brasília: Aneel, 2018.
- ALBUQUERQUE, M. K. O. **Estudo de viabilidade para implementação de um sistema fotovoltaico em um parque de abastecimento de aeronaves em Fortaleza/CE**. 105 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.
- ARAÚJO, A. J. N.; RANK, N. I.; BUENO, T. B. A. **Análise dos Fatores de Perdas nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica em Curitiba**. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- DOMINGOS. **Energia fotovoltaica em edifício unifamiliar – análise custo benefício**. 2014. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e tecnologia da Universidade de Nova Lisboa.
- FREITAS, Gustavo Magalhães de. **Estudo de viabilidade técnica e econômica da implantação de um sistema de microgeração fotovoltaica conectado à rede em condomínio de edifício residencial em Fortaleza-CE**. 2021. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- MACHADO, C.; MIRANDA, F. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma breve revisão**. Revista virtual de química. Niterói, RJ, vol. 7, n. 1, p. 126-143, 14, out. 2014.
- MELO, Igor Mesquita de. **Estudo de viabilidade para implantação de um sistema de geração fotovoltaica em uma fazenda no interior do Ceará**. 2021. 76 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro

de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

MME - Ministério de Minas e Energia. Demanda de Energia 2050. **Nota Técnica DEA 13/15. Empresa de Pesquisa Energética** - EPE, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Energia Solar no Brasil e Mundo** – ano de referência 2016. Brasília: MME, 2017.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico - **Sistema de Transmissão Horizonte – 2015**. 2015.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2ª ed., São José dos Campos, SP: INPE, 2017.

PINTO, Carlos et al. **Energia Solar**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2015.

SILVA, R. M. **Energia Solar: dos incentivos aos desafios**. Texto para discussão nº

166. Brasília. Senado Federal, 2015.

VILLALVA, Marcelo Gradella; Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo: Érica**, v. 2, 2015.

WORUBY, Mauro. **Sistema de energia solar residencial**. Ponta Grossa, 2018.





ACIONAMENTOS DE MOTORES COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

MOTOR DRIVES WITH FREQUENCY INVERTER

Glecycivan Santos
Paulo José Pinto Souza

16

Resumo

Este estudo investiga os sistemas elétricos de potência mais eficientes para o acionamento de motores elétricos, com foco em métodos como partida direta, estrela-triângulo e soft-starters. O objetivo geral é comparar esses métodos quanto às suas características e aplicações. Entre os objetivos específicos está a análise detalhada dos acionamentos de partida, destacando os diagramas de força envolvidos. A eletrônica de potência é fundamental para melhorar a eficiência energética e o controle de motores elétricos em ambientes industriais. A metodologia segue uma abordagem qualitativa descritiva, com revisão de literatura recente, incluindo artigos, livros e monografias dos últimos 10 anos, além de autores renomados. Os motores elétricos, essenciais para várias indústrias, dividem-se em motores de corrente contínua (CC) e alternada (CA). A soft-starter se destaca por controlar a potência na partida e frenagem, reduzindo correntes de pico e protegendo o sistema. A escolha do método de partida depende de fatores como potência do motor, tipo de operação e confiabilidade. Conclui-se que uma gestão energética eficiente, junto com a escolha correta do método de partida, é crucial para otimizar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas industriais.

Palavras-chave: Partida de motores. Controle. Soft-starters.

Abstract

This study investigates the most efficient electrical power systems for driving electric motors, focusing on methods such as direct starting, star-delta and soft-starters. The general objective is to compare these methods regarding their characteristics and applications. Among the specific objectives is the detailed analysis of the starter drives, highlighting the force diagrams involved. Power electronics is fundamental to improving energy efficiency and control of electric motors in industrial environments. The methodology follows a qualitative descriptive approach, with a review of recent literature, including articles, books and monographs from the last 10 years, as well as renowned authors. Electric motors, essential for various industries, are divided into direct current (DC) and alternating current (AC) motors. The soft-starter stands out for controlling power during starting and braking, reducing peak currents and protecting the system. The choice of starting method depends on factors such as engine power, type of operation and reliability. It is concluded that efficient energy management, together with the correct choice of the starting method, is crucial to optimize the efficiency and reliability of industrial systems.

Keywords: SEP. Power transmission. Energy sources. Distribution.



1. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas elétricos para acionamentos de motores tem desempenhado um papel fundamental na revolução industrial e no avanço tecnológico em diversas áreas. A busca por eficiência, controle preciso e sustentabilidade impulsionou o desenvolvimento contínuo desses sistemas, resultando em contribuições significativas para a operação eficaz de uma ampla gama de máquinas e processos industriais (Santos, 2019).

Nesse contexto, os sistemas elétricos de acionamento de motores desempenham um papel crucial na eficiência, controle e desempenho dessas máquinas, tendo um impacto direto tanto no funcionamento das indústrias quanto na economia de energia. Diante das demandas crescentes por produtividade, sustentabilidade e otimização dos processos industriais, a pesquisa sobre as contribuições dos sistemas elétricos para acionamentos de motores emerge como uma área de interesse primordial (Ribeiro, 2017).

O objetivo fundamental de um motor elétrico é coordenar todos os elementos necessários não apenas para proteção contra sobrecorrentes e curtos-circuitos, mas também para regular a velocidade e a parada do motor. Nos sistemas de controle, diversas abordagens de partida dos motores são empregadas, desde as tradicionais partidas diretas e estrela-triângulo até as mais modernas e suaves, que envolvem eletrônica de potência avançada.

Neste contexto, a relevância do estudo reside na sua capacidade de abordar desafios atuais e futuros relacionados ao acionamento de motores de indução. Com a demanda contínua por eficiência energética e sustentabilidade, a seleção adequada de sistemas elétricos e tecnologias de controle pode resultar em economia significativa de energia e aumento da vida útil dos equipamentos.

O emprego de sistemas de comando elétrico se destaca como uma resposta crucial para operar máquinas elétricas de maneira precisa, segura e eficiente, enquanto as inovações tecnológicas continuam a moldar esse cenário de forma dinâmica. Diante desse contexto nasce uma problemática a ser analisada: Parte superior do formulário Qual é o impacto das contribuições dos sistemas elétricos nos acionamentos de motores?

O objetivo geral da pesquisa foi compreender os sistemas elétricos que são mais viáveis para o acionamento dos motores de indução. Já os objetivos específicos foram: Descrever os acionamentos de partidas com os diagramas de força e por fim eficiência do dispositivo eletrônico soft-starter.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilita a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros, relatos de experiência e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

2.2 Resultados e Discussão

Os motores elétricos representam dispositivos que convertem energia elétrica em energia mecânica, a qual é utilizada para acionar diversas cargas por meio do movimento de seu eixo. Estes motores são essenciais em várias vertentes industriais, independentemente do tamanho da indústria. Dependendo da natureza da alimentação elétrica, seja corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), os motores elétricos são categorizados em motores CC e motores CA (Maciel, 2017).

A distinção principal entre os motores CA e CC reside no controle de sua velocidade. Nos motores CC, a relação entre tensão e corrente é linear, sendo que a velocidade é ajustada alterando a tensão - por exemplo, reduzindo-a de 100V para 50V. A grande vantagem destes motores é a habilidade de variar a velocidade enquanto mantém um torque constante. Entretanto, suas desvantagens incluem custos elevados e a necessidade de uma fonte de alimentação especial, como uma fonte de corrente contínua ou retificadores (Ribeiro, 2017).

Por outro lado, nos motores CA, a velocidade é determinada pela frequência da corrente alternada, a qual normalmente é fixa. Isso os torna ideais para aplicações industriais, aproveitando vantagens como rotações mais elevadas, manutenção simplificada e baixo ruído. Enquanto os motores CC são considerados ultrapassados e destinados a usos específicos, os motores CA são amplamente empregados na indústria (Santos, 2019).

De acordo Souza (2024), quando as bobinas do estator geram corrente trifásica, isso resulta na criação de um campo magnético. Esse campo magnético, por sua vez, induz diretamente uma corrente no rotor. Essa corrente é gerada no mesmo campo magnético e é essa interação que dá origem ao torque que impulsiona a rotação do eixo.

Segundo Lins (2019), entre os tipos de motores elétricos, o motor de indução com rotor de gaiola é amplamente utilizado. Isso se deve ao seu custo de manutenção mais baixo e ao menor custo inicial em comparação com motores de rotor bobinado. A estrutura desse motor é composta por um núcleo magnético, barras condutoras e anéis em curto-circuito que interligam as barras.

Os tipos de motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) possuem distintas características. No contexto dos motores CA, uma das características proeminentes diz respeito ao comportamento do rotor em relação ao campo magnético gerado no estator. Notavelmente, no caso dos motores CA, o rotor não alcança a mesma velocidade do campo magnético rotativo gerado no estator (Carvalho, 2014).

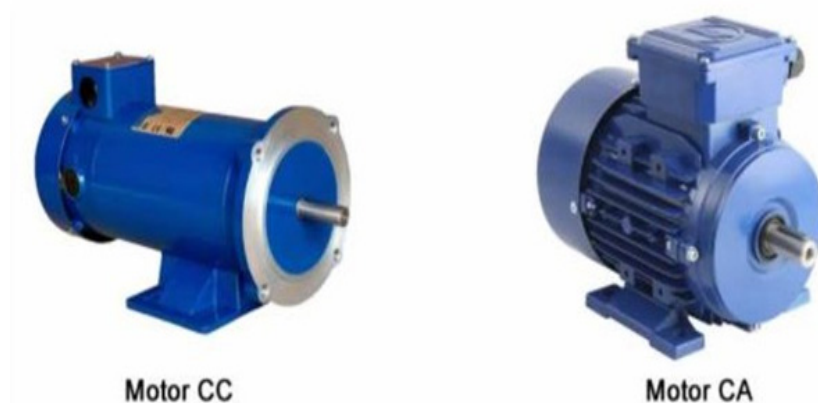


Figura 1. Motor CC e CA
Fonte: (Maciel, 2017).

Conforme discutido por Bai *et al.* (2019), existem três categorias principais de motores elétricos: em série, em derivação e compostos. Os motores em série usam a mesma corrente para alimentar a carga e excitar o campo. No entanto, esses motores não podem operar sem carga, pois sua velocidade tende a aumentar a níveis que podem causar danos.

Em contrapartida, os motores em derivação estão diretamente ligados à fonte de alimentação e operam em paralelo, mantendo uma velocidade constante. Os motores compostos são uma combinação dos dois tipos anteriores, consistindo em duas bobinas: uma em série e outra em paralelo. Esses motores possuem um alto torque de partida e velocidade (Gabri; Souza, 2018).

O correto funcionamento e a eficácia no uso da energia elétrica dependem crucialmente das partidas empregadas em motores elétricos. Estas desempenham um papel fundamental ao minimizar perdas, assegurar uma vida útil prolongada e proporcionar confiabilidade essencial para a execução bem-sucedida das atividades cotidianas (Rabello, 2016).

A incorporação de motores elétricos juntamente com sistemas de acionamento automático encontra aplicação em diversas áreas, como sistemas de tração, esteiras transportadoras, bombas hidráulicas, transporte de fluidos, manuseio de cargas e automação industrial. Dentre as opções disponíveis, destacam-se as partidas mais comuns: partida direta, partida direta com reversão, partida estrela-triângulo, partida estrela-triângulo com reversão, partida com autotransformador (também conhecida como “Chave Compensadora”) e sua variante com reversão (Santos, 2019).

A partida direta representa recebe a alimentação elétrica de maneira direta, proveniente da fonte geradora. Essa abordagem requer a implementação de componentes como contatores, disjuntores e um relé térmico, desempenhando a função de salvaguardar o circuito. A instalação desse tipo de partida demanda a consideração de três fatores essenciais para a ativação bem-sucedida desse comando (Bai *et al.*, 2019).

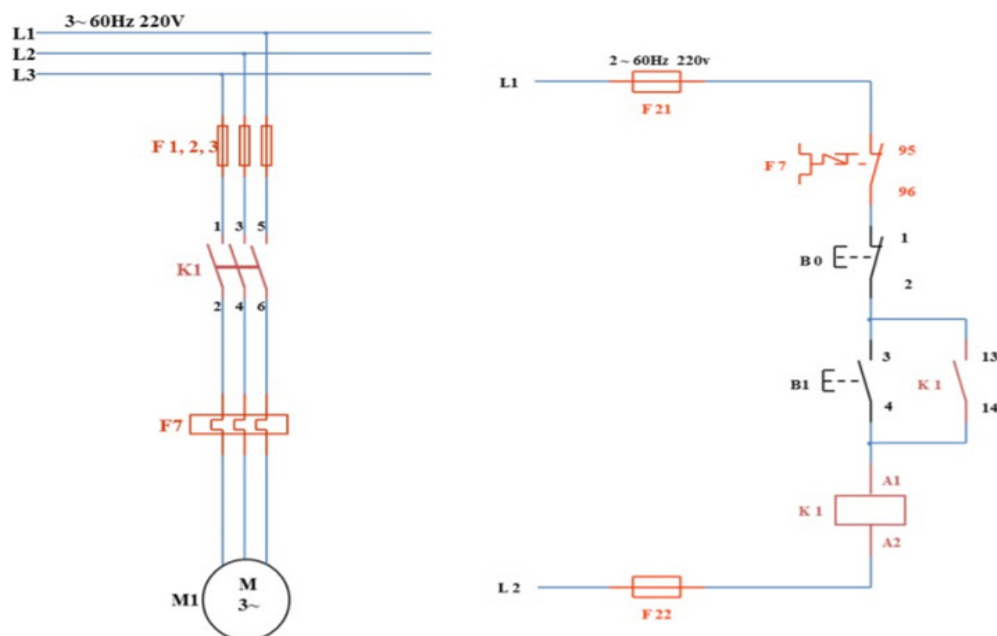


Figura 2. Diagrama Unifilar de Partida Direta

Fonte: (Sala da Elétrica, 2014)

Conforme explicado por Carvalho (2014), dois obstáculos podem impossibilitar a adoção dessa partida direta. O primeiro reside na potência do motor, caso ela exceda os limites estipulados pela concessionária para uma conexão direta à rede de alimentação. O segun-

do entrave refere-se a cargas que demandem um acionamento gradual e progressivo, o que torna inviável a aplicação da partida direta.

Na partida direta com reversão, ocorre uma defasagem de 120 graus no campo magnético girante entre as fases. Para atingir esse efeito, torna-se essencial inverter a polaridade de duas das três fases que alimentam o motor em questão (Sala Da Elétrica, 2014).

A alimentação do motor elétrico é fornecida por L1, L2 e L3, com os contatores K1 e K2 não permite que estejam ligados simultaneamente, se isso acontecer, um curto-circuito é gerado na saída dos contatores (Mundo Da Elétrica, 2014). A técnica de partida indireta, conhecida como partida “Estrela Triângulo”, tem como principal objetivo a redução da corrente de partida, permitindo que o motor alcance gradualmente seu estado de inércia. Posteriormente, ocorre a alteração das conexões das bobinas através dos comandos, permitindo que a corrente seja progressivamente aumentada até atingir a rotação nominal (Ribeiro, 2017). Parte superior do formulário

Nesse sistema de partida, o motor é inicialmente conectado em um arranjo de estrela (Y) durante a partida para reduzir a corrente de partida e, conseqüentemente, o impacto na rede elétrica. Uma vez que o motor atinge uma velocidade pré-determinada, ele é comutado para o arranjo de triângulo (Δ) para operação normal. Isso ajuda a reduzir o estresse sobre os enrolamentos do motor e a minimizar o impacto no sistema elétrico, tornando a partida mais suave e eficiente (Lins, 2019).

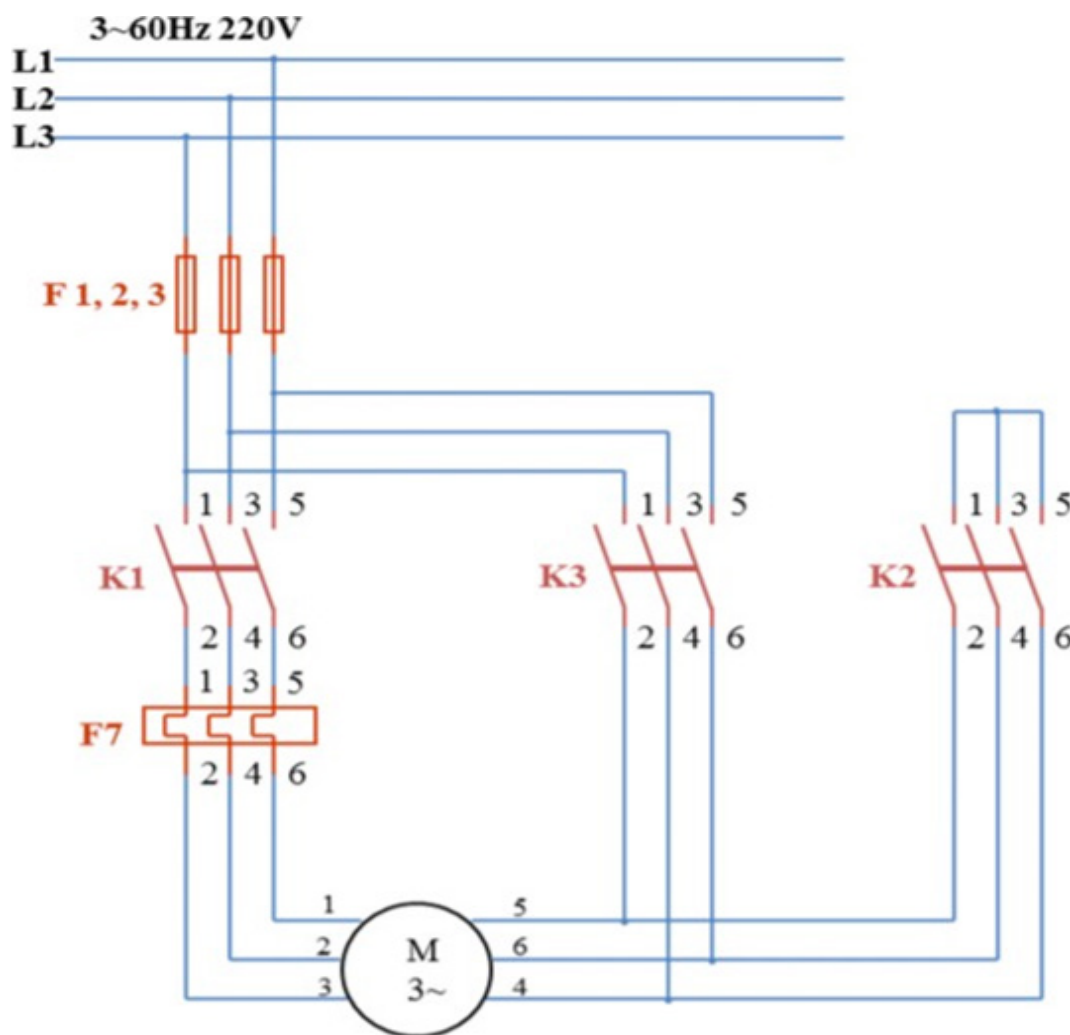


Figura 3. Diagrama Unifilar De Força da partida Estrela- Triangulo

Fonte: (Sala da Elétrica, 2014)

A Partida Estrela-Triângulo é especialmente usada em motores de grande porte, onde a corrente de partida pode ser muito alta e causar problemas de estabilidade na rede elétrica. Ao reduzir a corrente de partida, essa técnica ajuda a evitar quedas de tensão e flutuações na rede elétrica durante o acionamento do motor (Maciel, 2017).

2.2.1 Princípio funcionamento das chaves soft-starter

De acordo com Ribeiro (2017), a Soft-Starter representa um dispositivo eletrônico que exerce gerência sobre a potência do motor, tanto ao iniciá-lo quanto ao aplicar frenagem, tendo como fundamento central a regulação do ângulo de disparo (condução) dos tiristores.

A popularização da tecnologia e a crescente demanda por sistemas confiáveis têm impulsionado o uso de soft-starters. Equipamentos como ar-condicionados, sistemas de refrigeração industrial e compressores frequentemente utilizam esses dispositivos, especialmente quando conectados a fontes de alimentação instáveis ou de baixa confiabilidade (Santos, 2019). O esquema genérico de um soft-starter, mostrado na figura 4, ilustra a disposição dos tiristores e como eles são responsáveis por modular a tensão de entrada, proporcionando a partida e a frenagem controladas (Ribeiro, 2017).

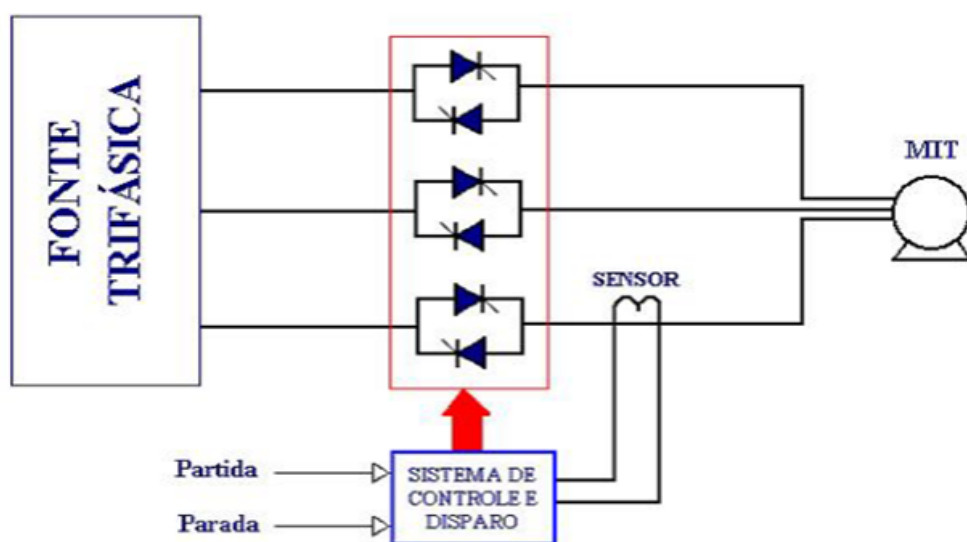


Figura 4. Esquema de um soft-starter implementado com 6 tiristores

Fonte: (Sala da Elétrica, 2014)

Soft-starters são utilizados principalmente para iniciar motores de indução CA (corrente alternada) do tipo gaiola, substituindo métodos tradicionais como estrela-triângulo, chave compensadora ou partida direta. A principal vantagem desse dispositivo é a eliminação de trancos no sistema, limitando a corrente de partida e evitando picos de corrente. Além disso, eles proporcionam paradas suaves e incorporam proteções contra falhas, melhorando a segurança e a eficiência do motor (Carvalho, 2014).

O princípio de funcionamento do soft-starter está baseado no uso de componentes estáticos, como os tiristores. Esses componentes permitem regular a tensão de alimentação do motor, resultando em um aumento gradual da corrente de partida. Isso garante que o motor entre em operação de forma mais suave, sem sobrecarregar o sistema elétrico (Carvalho, 2014).

De acordo com Carvalho (2014), na frenagem, o soft-starter também age de manei-

ra controlada, proporcionando uma desaceleração suave. Essa característica é importante para evitar choques mecânicos e aumentar a vida útil tanto do motor quanto dos componentes acoplados. A utilização de soft-starters é recomendada em diversas aplicações industriais, onde o controle preciso da partida e frenagem é essencial.

Esses dispositivos contribuem para a redução dos esforços sobre acoplamentos e outros elementos de transmissão durante a partida do motor, prolongando a vida útil tanto do motor quanto dos equipamentos mecânicos acionados. Além disso, a utilização de soft-starters pode resultar em economia de energia, o que os torna amplamente empregados em sistemas de bombeamento e refrigeração, onde a eficiência energética é crucial (Souza, 2024).

De acordo com Souza (2024), o soft-starter é um equipamento eletrônico projetado para controlar a potência do motor no momento da partida e também durante sua frenagem. Diferente dos sistemas elétricos convencionais, como partida com autotransformador ou chave estrela-triângulo, o soft-starter oferece um controle mais suave e preciso, evitando picos de corrente e trancos mecânicos.

Segundo Costa (2014), os soft-starters possuem a capacidade de serem configurados para operar apenas quando a sequência de fase estiver correta, garantindo a proteção das cargas que não podem girar em sentido contrário, como bombas. Esse recurso é essencial para prevenir danos mecânicos, especialmente em sistemas onde o sentido de rotação é crucial. Quando é necessária a reversão do sentido de rotação, isso pode ser realizado com o uso de contadores externos ao soft-starter.

Outra funcionalidade dos soft-starters é o plug-in, que adiciona diversas facilidades através de um módulo extra ou ajustes de parâmetros. Essas facilidades podem incluir relé eletrônico, frenagem CC ou AC, dupla rampa de aceleração para motores de duas velocidades, e realimentação de velocidade para garantir uma aceleração estável, independentemente das flutuações de carga (Santos, 2019).

Em termos de economia de energia, muitos soft-starters modernos possuem um circuito específico para essa finalidade. Esse recurso reduz a tensão aplicada quando o motor está operando sem carga, diminuindo as perdas no entreferro, que são responsáveis pela maior parte das perdas em motores com cargas baixas. A economia é mais significativa em motores que operam com até 50% de sua potência nominal, tornando o sistema mais eficiente em termos energéticos (Maciel, 2017).

2.2.2 Acionamento de Motor Trifásico com Inversor de Frequência

Conforme Lins (2019), o acionamento de motor trifásico por meio de inversor de frequência é amplamente utilizado para controlar a velocidade e o torque do motor de forma eficiente. O inversor realiza a conversão da tensão da rede elétrica, em corrente alternada (AC), para corrente contínua (DC), e posteriormente reconverte em corrente alternada com frequência e tensão variáveis. Esse processo permite um controle preciso da velocidade do motor, adequado a diversas aplicações industriais.

Segundo Rabello (2016), entre as principais vantagens do inversor de frequência estão o controle da velocidade e do torque do motor. A frequência de saída ajustável permite que o motor opere em diferentes faixas de velocidade, conforme a demanda. Além disso, o uso do inversor resulta em maior eficiência energética, uma vez que o consumo de energia é reduzido ao regular a velocidade do motor de acordo com as necessidades da operação.



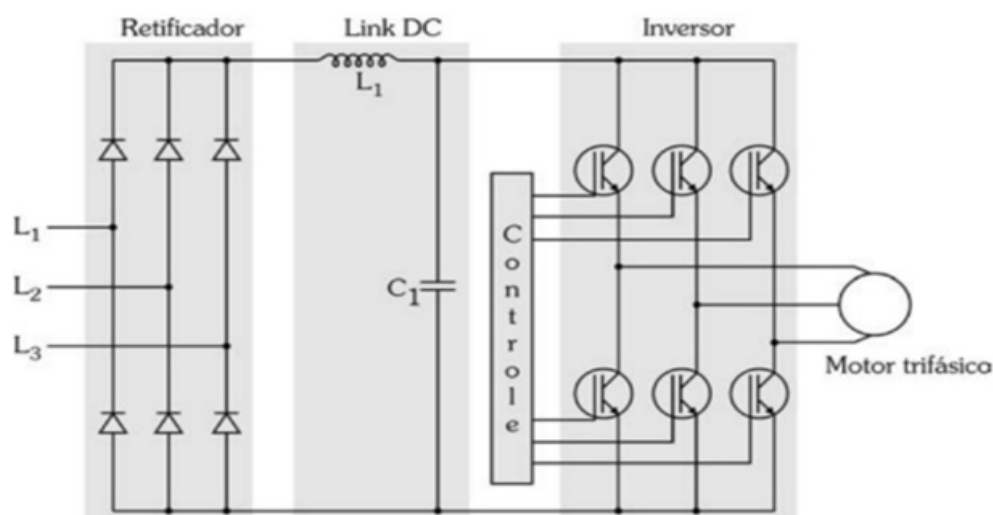


Figura 5. Circuito de um inversor de Frequência com alimentação trifásica.

Fonte: (Santos, 2019).

De acordo Santos (2019), o inversor de frequência também proporciona benefícios adicionais, como a proteção contra sobrecargas e flutuações de tensão, evitando danos ao motor. A função de partida suave (soft-start) permite reduzir os picos de corrente durante a partida, minimizando o desgaste mecânico e elétrico do sistema. Dessa forma, o uso de inversores aumenta a vida útil do equipamento e reduz a necessidade de manutenção.

A aplicação do acionamento de motores trifásicos com inversores de frequência é vasta e abrange diferentes setores da indústria, como sistemas de bombeamento, ventilação, e esteiras transportadoras. O inversor de frequência oferece flexibilidade e controle, garantindo que os motores operem com eficiência e segurança em diferentes condições de trabalho (Costa, 2014).

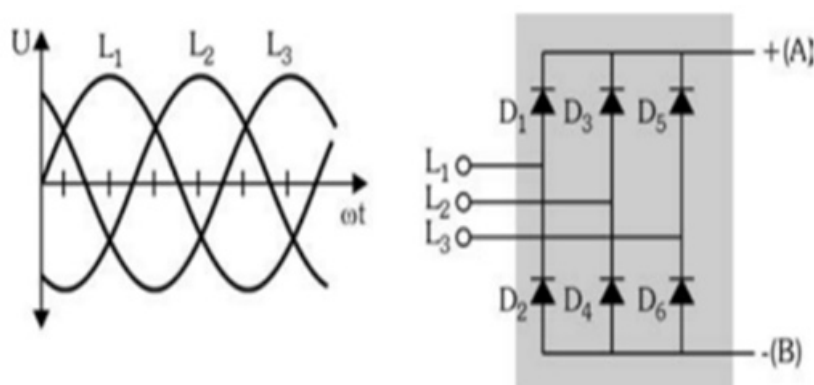


Figura 6. Sinais de Entrada na etapa de retificação com seis diodos

Fonte: Adaptado Cavalheiro (2014).

O circuito utiliza uma ponte de seis diodos para realizar a etapa de retificação do sinal, garantindo a conversão de corrente alternada (AC) em corrente contínua (DC). Esta retificação ocorre na parte do circuito destacada na Figura 5, que ilustra os sinais de entrada aplicados ao sistema. A ponte de diodos é fundamental para garantir que o sinal seja adequadamente convertido para a próxima etapa do processo de controle (Carvalho, 2014).

Na Figura 6, observa-se o sinal retificado intermediário, que é o resultado do processo

de retificação descrito anteriormente. Esse sinal ainda não é totalmente contínuo, mas apresenta uma forma que pode ser melhorada por meio de filtros ou outros componentes de suavização. O estágio de retificação é essencial para transformar a energia da rede em um formato utilizável para o motor ou outros dispositivos eletrônicos (Franchi, 2018).

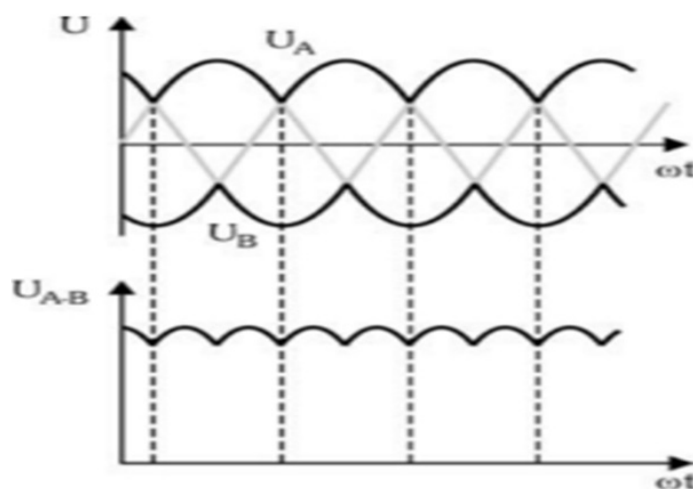


Figura 7. Sinais de entrada na etapa de retificação com alimentação trifásica

Fonte: Adaptado Cavalheiro (2014).

De acordo com Franchi (2018), a retificação com seis diodos é uma configuração típica para conversão trifásica, utilizada em diversos sistemas industriais e de automação. Essa etapa inicial é crucial para garantir o funcionamento correto do inversor de frequência e o controle preciso do motor, visto que a qualidade do sinal retificado impacta diretamente o desempenho do circuito como um todo.

O funcionamento da etapa de inversão pode ser compreendido com mais clareza por meio da Figura 8, que ilustra a atuação dos IGBTs (Transistores Bipolares de Porta Isolada). Esses transistores são acionados por pulsos gerados pelo módulo de controle através de uma técnica de modulação por largura de pulso (PWM) (Costa, 2014).

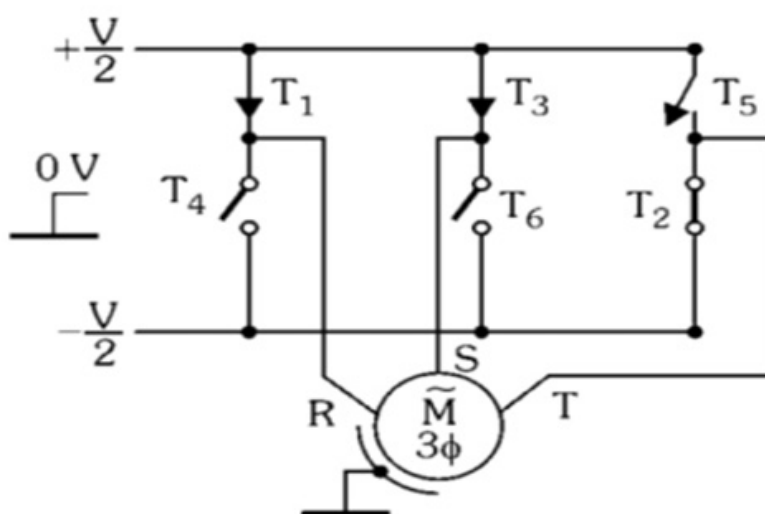


Figura 8. Etapa de Inversão para alimentação trifásica

Fonte: Franchi (2018).

Segundo Ribeiro (2017), dessa forma, o sinal intermediário retificado serve como base para o restante do processamento, permitindo o ajuste da tensão e frequência, possibilitando o controle de velocidade do motor trifásico. O uso de seis diodos garante uma retificação eficiente e estável, adequada para aplicações de alta potência e precisão.

De acordo com Franchi (2018), o acionamento dos IGBTs ocorre em pares, alternando-se durante o ciclo de operação. Inicialmente, são acionados os pares T1 e T2, seguidos pelos pares T3 e T4, e, por último, os pares T5 e T6. Após essa sequência, o ciclo de acionamento retorna ao início, garantindo a continuidade do processo de inversão da corrente.

Essa configuração de acionamento dos IGBTs, em conjunto com a técnica PWM, é crucial para a obtenção de uma saída de corrente com forma senoidal. A alta frequência dos pulsos permite suavizar o sinal de saída, aproximando-o de uma onda senoidal pura, o que é essencial para o correto funcionamento de motores trifásicos e outros dispositivos de potência. Por fim, a tensão de saída final gerada pelo processo de inversão pode ser visualizada na Figura 9.

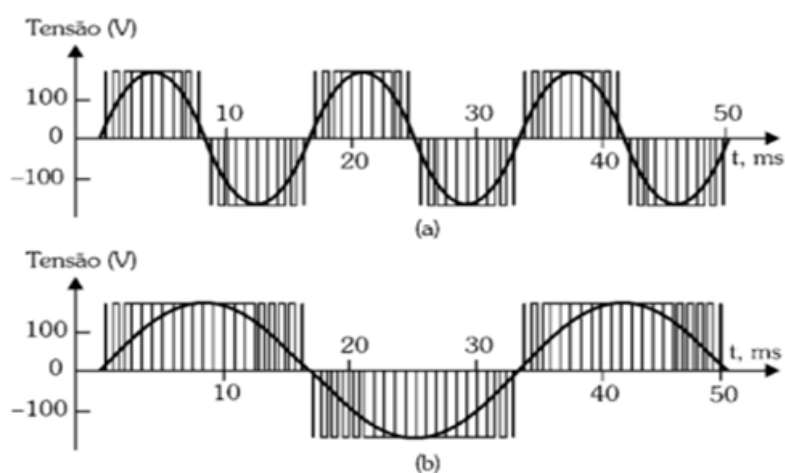


Figura 9. Tensão de Saída da etapa de Inversão para alimentação trifásica

Fonte: Adaptado Cavalheiro (2014).

De acordo com Franchi (2018), os acionamentos de motores com inversor de frequência são amplamente utilizados em sistemas industriais para controlar a velocidade, torque e direção de motores elétricos trifásicos. O inversor de frequência funciona convertendo a corrente alternada (AC) da rede elétrica em corrente contínua (DC) através de um retificador, e posteriormente reconvertendo essa corrente em alternada com frequências e tensões variáveis.

Uma das principais vantagens do inversor de frequência é a sua capacidade de controlar a velocidade do motor sem a necessidade de outros sistemas de redução mecânica. Ao ajustar a frequência e a tensão de saída, o inversor permite que o motor opere de forma eficiente em uma ampla faixa de velocidades, reduzindo o consumo de energia em situações de baixa demanda. Isso resulta em uma maior eficiência energética, além de oferecer um controle preciso sobre o torque (Franchi, 2018).

Segundo Bai *et al.* (2019), os inversores de frequência também proporcionam uma partida suave do motor, limitando a corrente inicial e evitando picos de energia, o que protege o motor e os componentes mecânicos do sistema. Além disso, eles oferecem diversas proteções, como sobrecarga e superaquecimento, aumentando a vida útil do equipamento. Esses recursos tornam o inversor uma escolha ideal para aplicações que exigem um controle avançado e seguro do motor.

Os acionamentos de motores com inversor de frequência são amplamente aplicados em sistemas de ventilação, bombeamento, esteiras transportadoras e outras áreas industriais que demandam controle variável de velocidade. O uso dessa tecnologia proporciona um funcionamento mais flexível, eficiente e confiável, sendo uma solução indispensável para otimizar o desempenho de motores elétricos em diversas aplicações (Santos, 2019).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os motores elétricos desempenham um papel significativo no consumo total de energia dentro do setor industrial. Por isso, é crucial que a indústria dedique a devida atenção à gestão energética, visando evitar desperdícios. Isso pode ser alcançado através da otimização dos tempos de operação das máquinas e do aumento de sua eficiência.

A seleção da técnica de partida para motores elétricos é um processo que considera diversos fatores, como a natureza das operações que o motor irá realizar, as condições das instalações, a potência nominal do motor e as técnicas que podem aumentar a confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

A partida direta é uma abordagem em que o motor é conectado diretamente à rede elétrica, fornecendo a plena tensão desde o início. Uma alternativa é a partida estrela-triângulo. Nesse método, o motor é inicialmente conectado em uma configuração de baixa tensão (partida em estrela), permitindo uma partida mais suave em comparação com a partida direta. Após atingir a velocidade nominal, ocorre a comutação para a configuração triângulo, permitindo que o motor opere em sua capacidade máxima.

Conclui-se que a escolha adequada da técnica de partida para motores elétricos é fundamental para a eficiência energética e a confiabilidade dos sistemas industriais. A partida direta, apesar de simples, pode gerar elevadas correntes de pico, enquanto a partida estrela-triângulo oferece uma alternativa mais suave e eficiente, especialmente em motores de maior potência. A utilização de soft-starters e inversores de frequência também pode ser uma solução eficaz para controlar melhor o desempenho do motor e reduzir o consumo de energia.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise comparativa mais profunda entre técnicas de partida e seu impacto em diferentes tipos de motores e aplicações industriais. Além disso, a implementação de novas tecnologias, como sistemas de automação avançada e monitoramento em tempo real, pode ser explorada como forma de melhorar ainda mais a gestão energética e a eficiência dos motores elétricos nas indústrias.

REFERÊNCIAS

BAI, Yingchun; LEI, Fei; LIU, Jinhong; ZHU, Wenhao. **A novel approach for electric powertrain optimization considering vehicle power performance, energy consumption and ride comfort**. Energy, v. 167, n. 01, p. 1040-1050, 2019.

CAVALHEIRO, Ivandro Toscani. **Análise das distorções harmônicas geradas pelo acionamento de um motor elétrico através de um inversor de frequência**. Orientador: Jumar Luís Russi. 2014. 128 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Elétrica, Alegrete, 2014.

COSTA, Mateus Henrique. **Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo: inversores de frequência x chaves de partida estática (Soft-Starter)**. 2014. 84f. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.



FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. Saraiva Educação SA, 2018.

GALORI, Kleiton Santos; SOUZA, Ronaldo Donizeti de. **Inversor de frequência com acionamento de motor**. 2018.

LINS, Vitor Fernando Machado. **Aplicação de inversores de frequência como uma alternativa para sistemas de elevação de carga do tipo pontes rolantes**. 2019. 75f. Monografia (Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2019.

MACIEL, Eduardo Filipe Pereira. **Acionamento de um motor cc alimentado por painéis fotovoltaicos baseado em técnicas MPPT**. 2017. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

RABELLO, Renato Gomes. **Proposta de prática com Soft-Starter para o laboratório de eletricidade da FGA**. 2016. 75f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

RIBEIRO, Lais Lima. **Estudo e análise do uso do equipamento Soft-Starter em práticas de laboratório de eletricidade**. 2017. 92 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SALA DA ELÉTRICA. **10 Partidas de motores que você precisa conhecer**. 2014. Disponível em: <https://www.saladaeletrica.com.br/comandos-eletricos/.pdf>. Acesso em: 4 março. 2024.

SANTOS, Ana Cristina Cardoso dos. **Estado da arte do acionamento de motores de indução através de inversores de frequência**. 2019. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SOUZA, Lucas Raphael Carvalho. **Simulação e teste de acionamento de um motor síncrono por inversor de frequência**. 2024. 65 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.



ESTUDO DO CONVERSOR CA/CC EM LEDS DE POTÊNCIA

STUDY OF AC/DC CONVERTER IN POWER LEDS

Wenderson Lindoso da Silva
Paulo José Pinto Souza

17

Resumo

A busca por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis tem se intensificado, especialmente no setor de iluminação, onde os LEDs de potência emergem como uma alternativa promissora devido à sua alta eficiência e longa vida útil. No entanto, para otimizar o desempenho dos LEDs, é essencial contar com sistemas eletrônicos que realizem uma conversão de energia adequada, destacando-se, nesse contexto, os conversores CA/CC. Embora os conversores convencionais sejam amplamente utilizados, eles apresentam desafios como perdas de eficiência e complexidade na regulação da tensão de saída. Este artigo tem como objetivo principal estudar a aplicação de capacitores chaveados em conversores CA/CC para LEDs de potência, analisando sua eficiência energética e seu funcionamento. A metodologia utilizada envolve uma revisão das técnicas de conversão de energia, focando na integração dos capacitores chaveados para melhorar o desempenho do sistema. As considerações finais indicam que a utilização de capacitores chaveados em conversores CA/CC pode reduzir as perdas de eficiência, melhorar a regulação da tensão e prolongar a vida útil dos LEDs. Assim, a pesquisa contribui para o entendimento das técnicas de conversão de energia e seu impacto na eficiência e sustentabilidade dos sistemas de iluminação com LEDs de alta potência.

Palavras-chave: LEDs de potência. Conversores CA/CC. Capacitores chaveados. Eficiência energética.

Abstract

The search for more efficient and sustainable energy solutions has intensified, especially in the lighting sector, where power LEDs are emerging as a promising alternative due to their high efficiency and long service life. However, to optimize LED performance, it is essential to have electronic systems that perform adequate energy conversion, with AC/DC converters standing out in this context. Although conventional converters are widely used, they present challenges such as efficiency losses and complexity in output voltage regulation. This article aims to study the application of switched capacitors in AC/DC converters for power LEDs, analyzing their energy efficiency and operation. The methodology used involves a review of energy conversion techniques, focusing on the integration of switched capacitors to improve system performance. The final considerations indicate that the use of switched capacitors in AC/DC converters can reduce efficiency losses, improve voltage regulation, and extend the service life of LEDs.

Keywords: Power LEDs. AC/DC converters. Switched capacitors. Energy efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis tem se intensificado em diversas áreas, especialmente no setor de iluminação. Os LEDs (diodos emissores de luz) de potência surgem como uma alternativa promissora, devido à sua alta eficiência, longa vida útil e baixo consumo energético, quando comparados a tecnologias tradicionais de iluminação (Freitas, 2020).

No entanto, o desempenho otimizado dos LEDs depende de sistemas eletrônicos que possam fornecer uma conversão de energia adequada e eficiente. É nesse contexto que os conversores CA/CC (corrente alternada para corrente contínua) se destacam, sendo essenciais para adaptar a tensão e corrente da rede elétrica às necessidades dos LEDs (Santos Filho, 2015).

Os conversores CA/CC convencionais, embora amplamente utilizados, apresentam desafios que incluem perdas de eficiência e complexidade na regulação da tensão de saída. A introdução de capacitores chaveados nesses conversores tem sido apontada como uma solução promissora para superar tais desafios (Cunha, 2020).

A crescente demanda por soluções de iluminação eficientes e ambientalmente sustentáveis coloca os LEDs de potência no centro das atenções, graças às suas características de alta eficiência luminosa e baixo consumo de energia. No entanto, o desempenho ideal desses dispositivos depende da qualidade dos sistemas de conversão de energia que os alimentam. Os conversores CA/CC desempenham um papel crucial nesse contexto, pois são responsáveis por transformar a energia da rede elétrica, que é fornecida em corrente alternada (CA), em corrente contínua (CC), adequada para os LEDs.

Apesar das vantagens oferecidas pelos LEDs de potência em termos de eficiência energética e durabilidade, o desempenho desses dispositivos está diretamente relacionado à qualidade dos conversores CA/CC que os alimentam. Os conversores convencionais, contudo, enfrentam desafios como perdas de eficiência, dificuldades na regulação da tensão de saída e geração de calor excessivo, o que pode comprometer tanto a performance quanto a vida útil dos LEDs.

Nesse contexto, surge a questão central deste estudo: Qual a importância do uso de capacitores chaveados em conversores CA/CC na eficiência energética e a durabilidade dos LEDs de potência, minimizando as limitações apresentadas pelos conversores tradicionais?

O presente artigo tem como objetivo principal estudar a aplicação de capacitores chaveados em conversores CA/CC para LEDs de potência. Especificamente, busca-se descrever o funcionamento desses conversores no contexto dos LEDs e analisar a eficiência energética do sistema de conversão. A pesquisa visa contribuir para o entendimento das técnicas de conversão de energia e seu impacto no desempenho e economia de sistemas de iluminação com LEDs de alta potência.

A metodologia adotada no presente estudo foi de natureza qualitativa e descritiva, centrada em uma revisão de literatura. Esse método permitiu a análise e a síntese de informações previamente publicadas, orientando as conclusões em relação ao tema investigado. Para a elaboração da pesquisa, foi realizada uma extensa revisão bibliográfica utilizando fontes como artigos científicos, livros, monografias e dissertações, acessadas por meio de plataformas acadêmicas como Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e repositórios de teses de universidades brasileiras.



A pesquisa envolveu uma leitura crítica e analítica do material selecionado, visando identificar teorias e conceitos que pudessem direcionar a resposta ao problema de pesquisa. Para garantir a atualidade e a relevância das informações, foram priorizados trabalhos publicados nos últimos 10 anos. Adicionalmente, foram consultados livros de autores reconhecidos na área de eletrônica de potência, como Santos Filho (2015), Miranda (2022) e Freitas (2022), para aprofundar e fundamentar a análise teórica realizada.

2. DESENVOLVIMENTO

2.2 Resultados e Discussão

De acordo com Santos Filho (2015), os conversores chaveados foram desenvolvidos na década de 1960 para substituir os conversores lineares convencionais, que eram volumosos, pesados e pouco eficientes. Os conversores lineares, com alta dissipação de energia, não atendiam às novas demandas por equipamentos mais compactos e eficientes.

Segundo Cunha (2020), com o avanço da microeletrônica e a crescente necessidade de dispositivos de baixo consumo, os conversores chaveados começaram a ser amplamente utilizados. Eles oferecem um desempenho superior em termos de eficiência e tamanho, atendendo melhor às exigências do mercado por tecnologia mais avançada e economizando espaço e energia.

Os equipamentos eletrônicos e eletroeletrônicos, presentes tanto em ambientes industriais quanto residenciais, geralmente operam com corrente contínua (CC). Embora existam fontes de energia CC, como baterias e painéis solares, muitos desses dispositivos utilizam a rede elétrica em corrente alternada (CA) para sua alimentação. Para adaptar a tensão e a corrente da fonte de energia CA para as necessidades da carga CC, é necessário um circuito eletrônico específico (Nolasco, 2018).

O gráfico da figura 1 inferior apresenta a corrente de entrada, mostrada em laranja, com uma escala de 500 A por divisão. Esta forma de onda revela a corrente que flui para o conversor a partir da fonte de alimentação. Juntas, essas formas de onda fornecem uma visão abrangente do comportamento do conversor SCC CA-CC, ilustrando a interação entre tensão e corrente durante o processo de conversão (Mendonça, 2014).

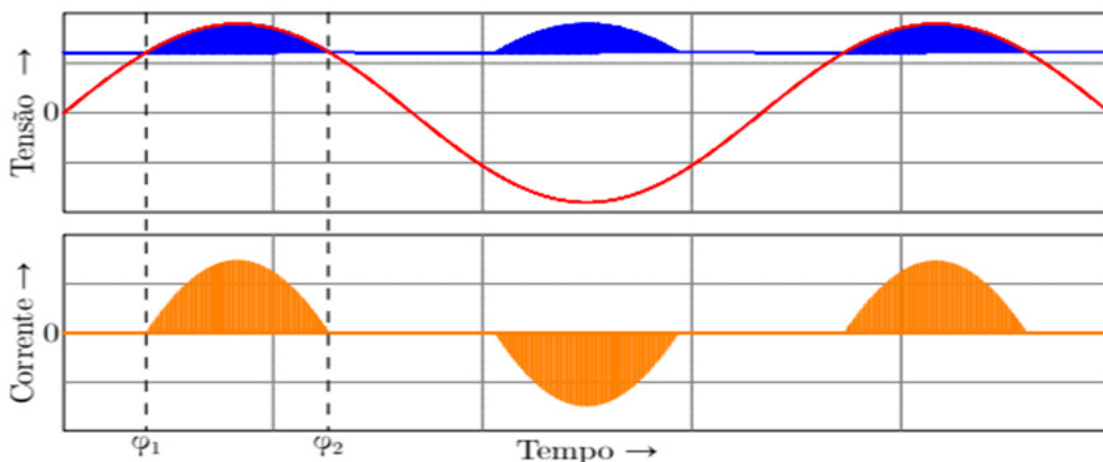


Figura 1. Invólucros das três categorias de LED.

Fonte: Coelho (2016).

No conversor SCC CA-CC, as formas de onda são apresentadas em dois gráficos dis-

tintos. No gráfico superior, a tensão de entrada (representada em vermelho) e a tensão nos capacitores chaveados (em azul) são exibidas. A escala para ambas as tensões é de 100 V por divisão. A forma de onda da tensão de entrada indica o valor da tensão aplicada ao conversor, enquanto a tensão nos capacitores chaveados mostra como a tensão varia ao longo do tempo conforme o conversor opera (Corrêa *et al.*, 2020).

Os conversores chaveados, também conhecidos como conversores estáticos de potência, são classificados com base nas características de entrada e saída, que podem ser em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Isso resulta em quatro combinações possíveis: CA-CA, CA-CC, CC-CA e CC-CC. Além disso, alguns circuitos possuem a capacidade de operar de forma bidirecional, permitindo a alteração da direção do fluxo de energia conforme necessário (Miranda, 2022).

Conforme Oliveira Rabelo (2020), o processamento da energia em conversores chaveados pode envolver múltiplas etapas, utilizando mais de um tipo de conversor para atingir o resultado desejado. Isso é especialmente relevante em sistemas complexos onde a eficiência e a flexibilidade são cruciais. A configuração e o número de etapas dependem das necessidades específicas do sistema e das características dos conversores empregados.

Esse circuito, conhecido como conversor estático CA-CC, desempenha um papel fundamental em converter a energia da rede elétrica em um formato compatível com os equipamentos. Ele ajusta o nível e a forma da tensão e corrente para garantir que os dispositivos eletrônicos funcionem corretamente e de forma segura (Costa *et al.*, 2023).

Um conversor estático CA-CC deve atender a vários requisitos para garantir a eficiência e a segurança no fornecimento de energia. Primeiramente, ele deve assegurar uma conversão eficiente da corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), minimizando perdas de energia e mantendo a estabilidade da tensão de saída. A eficiência do conversor é crucial para reduzir o desperdício de energia e evitar o aquecimento excessivo dos componentes (Nolasco, 2018).

Segundo Cunha (2020), outro requisito importante é a compatibilidade com diferentes tipos de fontes de CA, que podem variar em tensão e frequência. O conversor deve ser capaz de lidar com essas variações e fornecer uma saída de CC estável e precisa, independentemente das flutuações na entrada. Isso assegura que os equipamentos eletrônicos funcionem de forma confiável e com desempenho adequado.

2.2.1 Conversores SC para LEDs

Os LEDs desempenham um papel significativo em diversas aplicações, como em grandes painéis luminosos, na iluminação de automóveis, em aviões e em semáforos. No futuro, sua importância se expandirá, abrangendo tanto a iluminação arquitetônica quanto a iluminação geral (Spode *et al.*, 2023).

Além de suas aplicações convencionais, os LEDs estão se destacando em áreas como comunicação óptica, sensores, impressoras e digitalizadores de documentos. Essa expansão nas aplicações dos LEDs evidencia o potencial dessas tecnologias para transformar diversos setores e promover avanços significativos na maneira como interagimos com a luz e a informação (Sausen, 2023).

De acordo com Zappulla *et al.* (2023), os LEDs podem ser classificados em três categorias principais: LEDs indicadores, LEDs de alto brilho (HB-LEDs) e LEDs de potência. LEDs indicadores são amplamente utilizados em dispositivos como computadores e televisores, apresentando um invólucro colorido que atua como filtro óptico. Eles são comuns em apli-

cações que não requerem grande intensidade luminosa.

Os LEDs de alto brilho, por outro lado, são projetados para emitir luz sem a necessidade de filtros ópticos. Geralmente transparentes, esses LEDs têm uma eficiência superior e são usados em aplicações que demandam maior luminosidade, como em letreiros eletrônicos e semáforos (Miranda, 2022).

Introduzidos pela Lumileds em 1998, os LEDs de potência possuem um encapsulamento com baixa resistência térmica e exigem dissipadores devido à sua alta potência, geralmente acima de 1W. Eles são amplamente utilizados em iluminação de ambientes internos e em projetos arquitetônicos, oferecendo uma alternativa eficaz às lâmpadas halógenas. A Figura 2 mostra os invólucros mais comuns das três categorias de LED (Santos Filho, 2015).

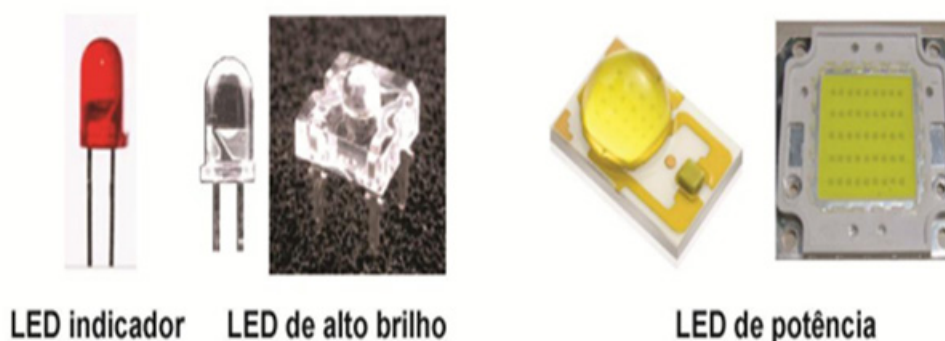


Figura 2. Invólucros das três categorias de LED.

Fonte: Santos Filho (2015).

Ainda segundo Santos Filho (2015), a crescente demanda por conversores de potência que ofereçam redução de peso e volume, alta eficiência de conversão e elevada densidade de potência para LEDs. Embora os conversores tradicionais, como *buck-boost*, *flyback* e conversores ressonantes, utilizem modulação PWM, eles ainda dependem de elementos indutivos para filtragem ou composição de circuitos ressonantes, mesmo quando a frequência de comutação é muito alta.

Corrêa et al. (2020), esta configuração oferece vantagens significativas, como a redução dos esforços nos interruptores e a simplicidade no controle da luminosidade do LED. A luminosidade pode ser ajustada de forma direta apenas pela variação na frequência de comutação: quanto maior a frequência, mais intensa é a luz emitida pelo LED. A figura 3 a seguir mostrar o circuito.

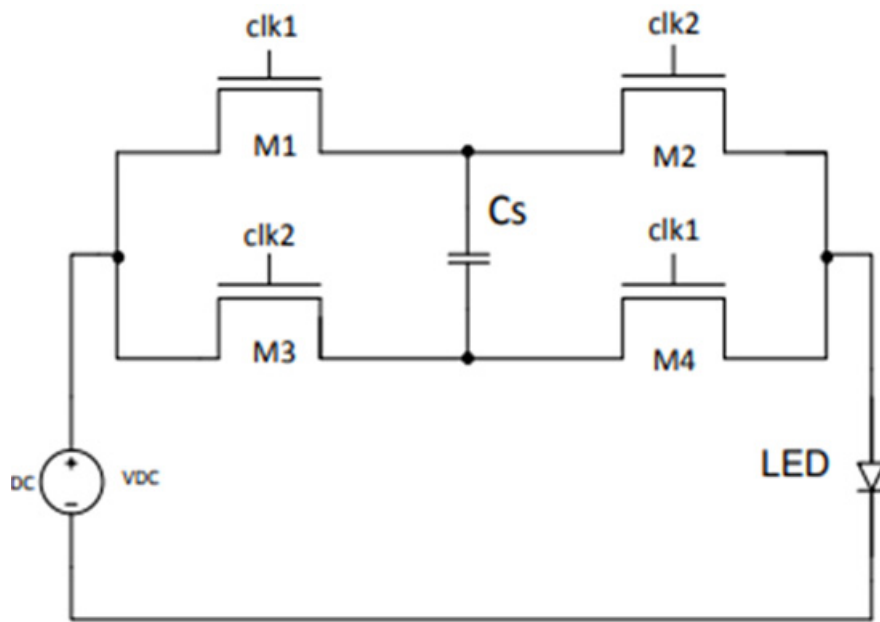


Figura 3. Diagrama do circuito de um conversor SC para LEDs.

Fonte: Santos Filho (2015).

No entanto, os conversores SC enfrentam desafios, como a corrente de entrada pulsante que pode introduzir interferência eletromagnética por condução. Além disso, os interruptores precisam ser sobredimensionados para suportar o estresse de carregamento instantâneo, o que pode limitar a eficiência e a durabilidade do sistema (Miranda, 2020).

De acordo com Oliveira Rabelo (2020), os conversores de tensão são essenciais em circuitos eletrônicos para fornecer uma tensão constante e estável, independente das variações na tensão de entrada ou na carga conectada. Um exemplo simples é o conversor linear regulador, que utiliza um regulador de tensão como o 7805 para manter uma tensão de saída constante de 5V.

Conversores com comutação suave são ideais para sistemas de acionamento de LEDs devido ao seu alto rendimento, que pode atingir até 97%, e à capacidade de operar em frequências elevadas. Esses conversores oferecem alta densidade de potência, reduzindo o tamanho e o peso dos componentes, transformadores e dissipadores em comparação com os conversores convencionais (Cunha, 2020).

A Figura 4 ilustra o princípio básico do conversor SC (*Switched Capacitor*) proposto. Em um ciclo completo de comutação, o capacitor no conversor é submetido a processos de carga e descarga alternados. Durante a fase de carga, a energia é armazenada no capacitor, enquanto na fase de descarga, essa energia é transferida para a carga (Spode *et al.*, 2023).

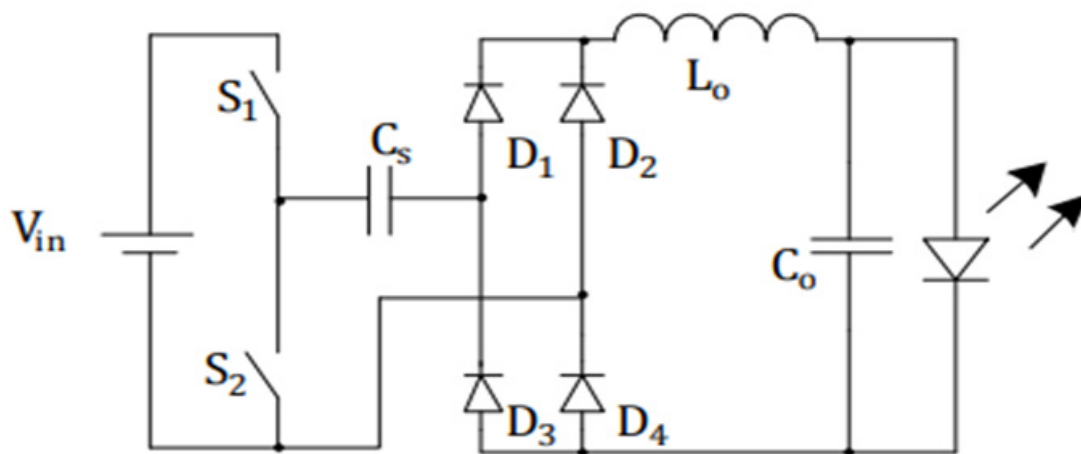


Figura 4. Circuito básico do conversor SC.

Fonte: Santos Filho (2015).

Para aplicações que exigem uma conversão mais eficiente, especialmente quando há uma grande diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída, o conversor *buck* é uma escolha popular. Este conversor *step-down* reduz a tensão de entrada usando um indutor, um capacitor, e um controlador de PWM para regular a largura do pulso do transistor, mantendo a tensão de saída constante (Cunha, 2020).

Os interruptores do circuito operam de forma complementar, garantindo que o processo de carga e descarga ocorra de maneira eficiente e controlada. Essa operação complementar dos interruptores é crucial para a correta transferência de energia e para a manutenção da eficiência do conversor SC (Spode *et al.*, 2023).

Ao aplicar capacitores em um conversor SC, pode-se obter a isolação do circuito, conforme apresentado na Figura 5. Um capacitor é um elemento composto por duas placas em paralelo, feitas de um material condutor e separadas por um material isolante. Dessa forma, as duas extremidades do capacitor são isoladas eletricamente (Freitas, 2022).

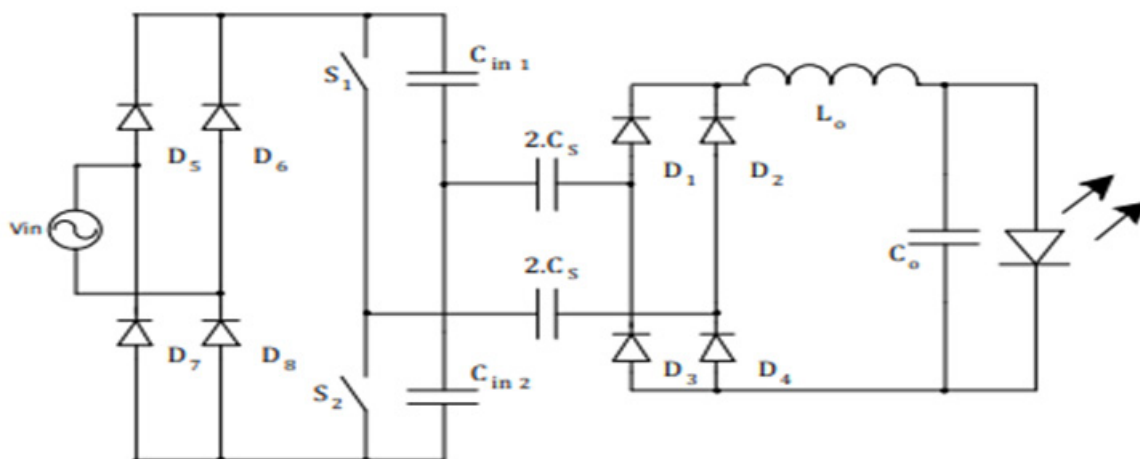


Figura 5. Circuito do conversor SC com dois capacitores chaveados

Fonte: Santos Filho (2015).

Segundo Corrêa *et al.* (2020), no circuito, foi utilizado um transformador abaixador com o objetivo de obter uma isolação do conversor SC com transformador galvânica entre a carga e a fonte de alimentação, além de reduzir a tensão sobre o capacitor e a carga, por meio da relação de transformação. Na Figura 6, é mostrado o conversor SC com o transformador, possibilitando a isolação entre a carga (LEDs) e a fonte de entrada (rede).

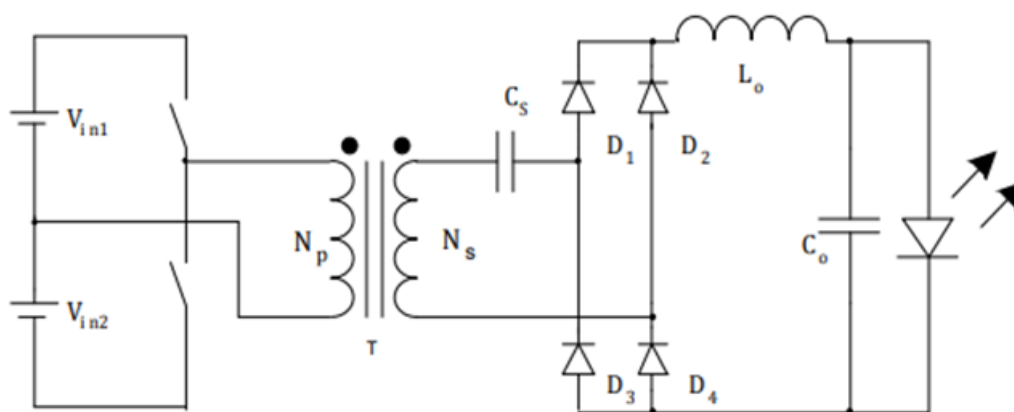


Figura 6. Circuito do conversor SC com dois capacitores chaveados

Fonte: Santos Filho (2015).

A indutância magnetizante do transformador possibilita a comutação suave nos interruptores, o que reduz as perdas de comutação e permite a comutação ZVS (*Zero Voltage Switching*) nos interruptores. Como consequência, há uma melhoria na eficiência do conversor. Essa vantagem possibilita que o conversor opere com frequências mais elevadas do que aquelas utilizadas nos circuitos convencionais (Nolasco, 2018).

2.2.2 Conversor SC (*Source Current*) para Leds de Potência

Um conversor SC (*Source Current*) para LEDs de potência é um dispositivo fundamental no controle de iluminação LED de alta intensidade. Ele é projetado para fornecer uma corrente constante e precisa aos LEDs, garantindo sua operação eficiente e prolongando sua vida útil. Esses conversores são essenciais em aplicações que exigem um brilho intenso e uma estabilidade luminosa confiável, como em iluminação pública e industrial (Santos Filho, 2015).

Mendonça (2014), relata que esses conversores trabalham ajustando a corrente elétrica que flui através dos LEDs, independentemente das variações na tensão da fonte de alimentação. Isso é crucial para evitar a sobrecarga dos LEDs e garantir que eles operem dentro de suas especificações de projeto. Além disso, o controle preciso da corrente ajuda a manter a qualidade da luz e a eficiência energética dos LEDs.

Outra característica importante dos conversores SC é sua capacidade de suportar diferentes configurações de LEDs e ajustar automaticamente a corrente conforme necessário. Isso proporciona flexibilidade no design do sistema de iluminação e permite a integração de LEDs com diferentes características e necessidades de corrente. O design do conversor deve levar em conta fatores como a tensão de entrada, a faixa de corrente e a capacidade de dissipação de calor (Sausen 2023).

A Figura 7 ilustra o comportamento de um LED branco de 3 W, *modelo Luxeon III Emitter LXHL-PW09*, fabricado pela *Philips-Lumileds*, quando operado a uma temperatura de 40 °C. A curva apresentada demonstra que, para este LED de potência, a corrente elétrica é praticamente nula quando a tensão aplicada é inferior à tensão de corte, que é de 2,6 V (Miranda, 2022).

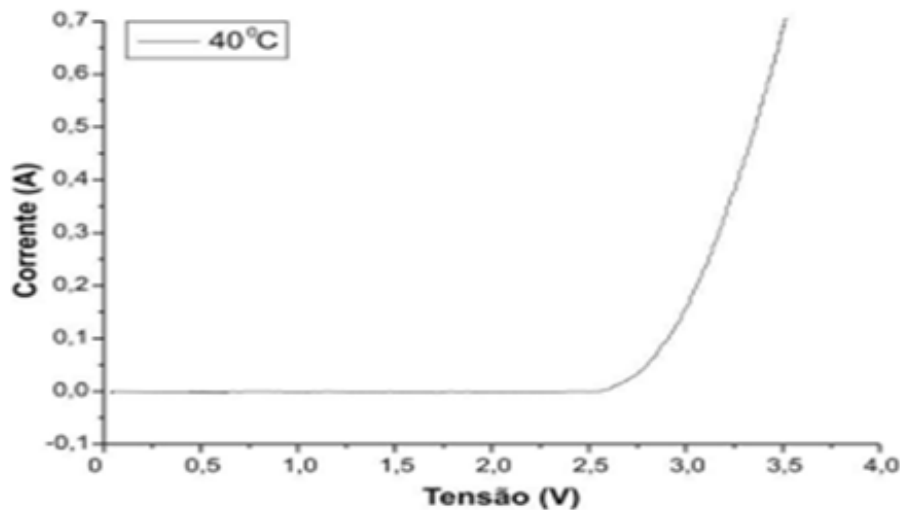


Figura 7. Curva I-V de um LED LXHL-PW09.

Fonte: Santos Filho (2015).

Além de melhorar a eficiência dos LEDs, o uso de conversores SC pode contribuir para a sustentabilidade e redução dos custos operacionais. Ao garantir uma operação constante e eficiente dos LEDs, eles ajudam a minimizar o desperdício de energia e prolongam a vida útil dos componentes, resultando em menos manutenção e substituições frequentes (Freitas, 2022).

De acordo com Spode *et al.* (2023), o modelo elétrico simplificado do LED, reproduzido nesta análise, será utilizado para simular o circuito proposto neste trabalho. Essa modelagem permite concluir que a tensão sobre o LED varia de acordo com a corrente que o atravessa. Portanto, é crucial considerar essas variações para garantir a eficiência e o desempenho adequados no projeto do circuito de controle para LEDs de potência.

A aplicação do conversor SCC CA-CC em LEDs de potência demonstrou um desempenho eficiente na conversão de energia elétrica para aplicações de iluminação de alta intensidade. Os testes mostraram que o conversor é capaz de fornecer a tensão e a corrente necessárias para operar os LEDs com alta precisão e estabilidade. As formas de onda obtidas indicam que o conversor mantém uma tensão constante nos LEDs, o que é crucial para garantir uma operação segura e eficiente, evitando flutuações que poderiam comprometer a vida útil dos LEDs (Cunha, 2020).

Os resultados experimentais revelaram que a eficiência do conversor SC é significativa, com baixa perda de energia durante a conversão. A corrente de entrada e a tensão aplicada aos LEDs foram monitoradas e ajustadas conforme necessário, garantindo que os LEDs recebessem a potência adequada sem sobrecarregar o sistema. Essa eficiência não só melhora o desempenho dos LEDs, mas também contribui para uma redução no consumo de energia e no aquecimento, fatores importantes em aplicações de iluminação de grande escala (Oliveira Rabelo, 2023).

Além disso, a análise das formas de onda mostrou que o conversor SC proporciona uma saída estável, minimizando as variações que poderiam afetar a luminosidade e a cor dos LEDs. A capacidade do conversor de adaptar-se às variações na carga e na tensão de entrada garante uma operação confiável e de longa duração. Em suma, a integração do conversor SCC CA-CC com LEDs de potência oferece uma solução eficiente e eficaz para aplicações que demandam alta qualidade de iluminação e confiabilidade (Costa *et al.*, 2023).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste estudo destacam a relevância da aplicação de capacitores chaveados em conversores CA/CC para LEDs de potência, evidenciando seu papel fundamental na otimização do desempenho e na eficiência energética dos sistemas de iluminação. A pesquisa demonstrou que a implementação desses capacitores pode mitigar as perdas associadas aos conversores convencionais, melhorando a regulação da tensão de saída e, conseqüentemente, prolongando a vida útil dos LEDs.

Além disso, a análise realizada reforça a necessidade de um aprofundamento contínuo nas técnicas de conversão de energia, especialmente em um cenário onde a demanda por soluções sustentáveis e eficientes é cada vez mais premente. Os desafios enfrentados pelos conversores convencionais indicam que novas abordagens e tecnologias, como a integração de capacitores chaveados, devem ser exploradas mais a fundo para otimizar ainda mais o desempenho dos sistemas de iluminação. Essa pesquisa abre espaço para investigações futuras sobre o comportamento dinâmico dos conversores e sua interação com diferentes tipos de LEDs.

Em termos de perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos experimentais que validem as simulações e análises teóricas apresentadas neste artigo. Ensaios práticos podem oferecer insights valiosos sobre a eficácia dos capacitores chaveados em diferentes configurações e condições operacionais, permitindo ajustes e melhorias nas estratégias de implementação.

Por fim, é essencial considerar o impacto ambiental e a sustentabilidade das soluções propostas. Trabalhos futuros devem explorar a aplicabilidade dos conversores CA/CC com capacitores chaveados em diferentes contextos, como em sistemas fotovoltaicos e em projetos de iluminação pública. Assim, a pesquisa poderá contribuir não apenas para a eficiência energética, mas também para a promoção de práticas sustentáveis que atendam às necessidades atuais e futuras da sociedade em termos de iluminação e uso responsável de recursos energéticos.

REFERÊNCIAS

- CORRÊA, Douglas Rosa. **Conversor SEPIC quadrático não isolado sem capacitores eletrolíticos para acionamento de iluminação a LED**. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.621>.
- COSTA, Marcelo Santos da et al. **Desenvolvimento de um conversor Half-Bridge ressonante LLC para o acionamento de LEDs UV-C e aplicação em ação germicida**. 2023.
- CUNHA, Lucas de Oliveira. **Estudo de caso da implementação de filtro EMI em um conversor elétrico aplicado a luminárias de tecnologia LED para vias públicas**. 2020.
- FREITAS, Cláudio Eduardo Justin de. **Estudo e desenvolvimento de um conversor CC-CC meia ponte utilizado em driver de LED para iluminação baseado em topologia assimétrica e operação ZVS**. 2022.
- SANTOS FILHO, E. E. **Conversor CA-CC com capacitor comutado com alto fator de potência para o acionamento de LEDs de potência**. 2015. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- MENDONÇA, Marcel Ribeiro. **Conversor CA-CC Flyback Trifásico Para Iluminação Pública Utilizando LEDs De Potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). 131p. Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2014.
- MIRANDA, P.H.A. **Estudo de uma topologia CA-CC trifásica de único estágio em alta frequência com correção de fator de potência e baixo flicker para leds de potência**. 2022. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.



NOLASCO, Josimar Ribeiro. **Controlador de LEDs de elevado fator de potência conectado à rede CA baseado no conversor Ćuk isolado**. 2018.

OLIVEIRA RABELLO, Mateus de; NOGUEIRA, Ferando José. Controladores de LEDs para iluminação com comutação de baixa frequência e elevado fator de potência. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, v. 2, n. 1, 2020.

SAUSEN, Eduardo Matheo. **Projeto de um inversor de tensão meia-ponte como kit didático para o ensino de eletrônica de potência**. 2023.

SPODE, Nelson da Silva et al. **Conexão alternativa do capacitor de saída em conversores integrados para drivers de LEDs e seu impacto na redução da ondulação de baixa frequência**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

ZAPPULLA, Gustavo Sathler et al. **Conversor ca-cc isolado de 500W com correção de fator de potência para aplicações aeronáuticas**. 2023.



ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA COMO FONTE GERADORA DE ENERGIA NO BRASIL

STUDY OF THE USE OF WIND ENERGY AS A SOURCE OF ENERGY
GENERATING IN BRAZIL

Wilton Nairon Silva Teixeira

18

Resumo

A geração de energia elétrica foi fundamental para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, cuja demanda por eletricidade cresceu constantemente. Dada a necessidade de diversificação da matriz energética e a busca por soluções sustentáveis, as fontes renováveis, especialmente a energia eólica, ganharam relevância. O Brasil possuía um vasto potencial eólico, especialmente em regiões costeiras, o que favoreceu sua inserção na matriz energética. Este projeto de pesquisa teve como objetivo estudar a viabilidade, os desafios e os benefícios da incorporação da energia eólica na matriz brasileira. A metodologia adotada consistiu em uma revisão de literatura qualitativa, baseada em artigos, livros e teses publicados nos últimos 10 anos. A pesquisa abordou a evolução das energias renováveis no Brasil, os aspectos técnicos da geração eólica e como essa fonte pôde auxiliar no atendimento da demanda energética, destacando a importância de uma matriz mais diversificada e sustentável. O estudo contribuiu para a compreensão do papel da energia eólica na construção de um futuro energético mais seguro e sustentável no Brasil. A geração de energia elétrica foi fundamental para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil, cuja demanda por eletricidade cresceu constantemente. Dada a necessidade de diversificação da matriz energética e a busca por soluções sustentáveis, as fontes renováveis, especialmente a energia eólica, ganharam relevância.

Palavras-chave: Geração de Energia. Renováveis. Sustentáveis. Eólica.

Abstract

Electricity generation has been fundamental to the socioeconomic development of Brazil, whose demand for electricity has been growing steadily. Given the need to diversify the energy matrix and the search for sustainable solutions, renewable sources, especially wind energy, have gained relevance. Brazil has a vast wind potential, especially in coastal regions, which has favored its inclusion in the energy matrix. This research project aimed to study the feasibility, challenges and benefits of incorporating wind energy into the Brazilian matrix. The methodology adopted consisted of a qualitative literature review, based on articles, books and theses published in the last 10 years. The research addressed the evolution of renewable energy in Brazil, the technical aspects of wind generation and how this source could help meet energy demand, highlighting the importance of a more diversified and sustainable matrix. The study contributed to the understanding of the role of wind energy in building a safer and more sustainable energy future in Brazil. Electricity generation has been fundamental to the socioeconomic development of Brazil, whose demand for electricity has been growing steadily. Given the need to diversify the energy matrix and the search for sustainable solutions, renewable sources, especially wind energy, have gained relevance.

Keywords: Power Generation. Renewable. Sustainable. Wind.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de um país. No Brasil, dadas as suas dimensões continentais e a crescente demanda por energia, a diversificação da matriz energética é essencial para garantir a sustentabilidade e a segurança do fornecimento (Silva, 2018).

Nesse contexto, as energias renováveis têm ganhado destaque como alternativas promissoras, não apenas pela sua contribuição na redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também por sua capacidade de aproveitar recursos naturais disponíveis de forma mais sustentável (Gomes; Henkes, 2014).

Entre as fontes de energia renovável, destaca-se a energia eólica, proveniente da conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade. A utilização da energia eólica como parte da matriz energética brasileira representa um passo significativo rumo à diversificação e à diminuição da dependência de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis. Além disso, o Brasil apresenta um vasto potencial para a geração de energia eólica, especialmente em regiões costeiras e planícies onde os ventos são consistentes e fortes (Silva, 2018).

Este projeto de pesquisa tem como objetivo explorar de forma abrangente a viabilidade, os desafios e os benefícios da incorporação da energia eólica na geração de eletricidade no Brasil. Será analisado o contexto da matriz energética brasileira, destacando suas principais fontes e suas limitações em termos de sustentabilidade. Em seguida, serão abordados os aspectos técnicos e tecnológicos da geração de energia eólica, incluindo a descrição do funcionamento de aerogeradores e a infraestrutura necessária para a implantação de parques eólicos (Cavali, 2016).

A geração de energia elétrica no Brasil é um tema de extrema relevância devido à crescente demanda por eletricidade, impulsionada pelo crescimento populacional, industrialização e desenvolvimento econômico. Historicamente, o Brasil tem sido amplamente dependente da energia hidrelétrica.

Com o contínuo aumento na demanda por energia no Brasil, as usinas hidrelétricas têm sido pressionadas a ampliar sua produção energética. No entanto, essas usinas enfrentam diversos desafios, especialmente em relação aos níveis de água de seus reservatórios em épocas específicas. Diante desse cenário, surge a indagação: de que maneira a incorporação da energia eólica poderia contribuir para atender a essa demanda energética?

O objetivo geral da pesquisa foi estudar a viabilidade do uso da energia eólica como uma alternativa na geração de energia elétrica no Brasil. Já os objetivos específicos foram: Descrever a evolução das energias renováveis na matriz energética Brasileira; Discorrer sobre a energia eólica e como ela pode auxiliar no suprimento de energia.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico,



Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para a busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área de energia renovável, como Rodrigues (2011), Silva (2018), Gomes e Henkes (2014), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise.

2.2 Resultados e Discussão

Conforme analisado por Cavali (2016), o aumento histórico das concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera foi grandemente impulsionado pela geração e utilização de energia. A crise desencadeada pelo choque do petróleo obrigou diversos países, incluindo o Brasil, a buscar alternativas capazes de substituir os combustíveis fósseis. Esse esforço não apenas representou uma solução para desafios tecnológicos e econômicos, mas também conduziu a uma reestruturação inovadora.

A matriz energética brasileira, historicamente, baseou-se na energia hidrelétrica devido às suas características hidrográficas favoráveis. No entanto, a forte dependência dessa única fonte de energia gerou preocupações ao longo dos anos. Diante disso, nas últimas décadas, o planejamento energético do país voltou-se para a diversificação, buscando a integração de novas fontes de geração que pudessem garantir maior segurança e sustentabilidade ao sistema (Silva, 2018).

ESPECIFICAÇÃO	GWh		07/06 %	Estrutura (%)	
	2006	2007(a)		2006	2007
HIDRO	348.805	374.015	7,2	75,7	77,4
NUCLEAR	13.754	12.350	-10,2	3,0	2,6
GÁS NATURAL	18.258	15.497	-15,1	4,0	3,2
CARVÃO MINERAL	7.222	6.792	-6,0	1,6	1,4
DERIVADOS DE PETRÓLEO	12.374	13.333	7,8	2,7	2,8
BIOMASSA	14.959	18.104	21,0	3,2	3,7
GÁS INDUSTRIAL	3.964	4.492	13,3	0,9	0,9
IMPORTAÇÃO	41.164	38.832	-5,7	8,9	8,0
TOTAL	460.500	483.415	5,0	100,0	100,0

Tabela 1. Recursos Brasileiros

Fonte: Silva (2018).

Esse movimento em direção à diversificação inclui o investimento em energias renováveis, como solar e eólica, bem como na expansão de fontes alternativas, como a biomassa e o gás natural. O objetivo é reduzir a vulnerabilidade diante de crises hídricas e atender à crescente demanda por energia de maneira mais equilibrada e sustentável, fortalecendo, assim, a matriz energética nacional (Carvalho, 2021).

Ao mesmo tempo, projeta-se uma redução gradativa na participação de usinas termelétricas a gás, que têm custos mais elevados e maiores emissões de gases de efeito estufa. Esse novo cenário busca equilibrar a segurança energética com os compromissos de sustentabilidade, alinhando-se às metas globais de redução de emissões e preservação ambiental. A Figura 1 mostrar a comparação das matrizes energéticas mundial e brasileira do ano de 2019.

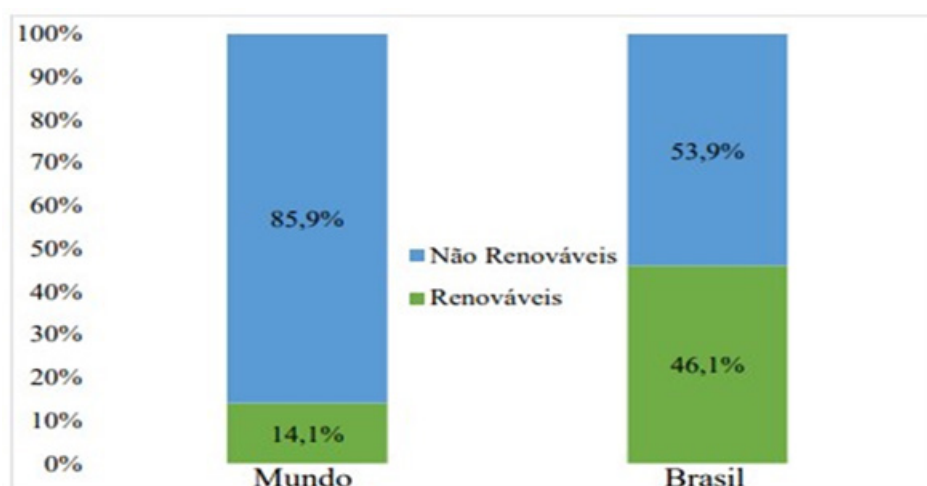


Figura 1. Recursos Brasileiros

Fonte: Adaptado Fernando (2022).

No contexto da crise energética no Brasil, surge uma imperativa necessidade de enfatizar os investimentos em fontes de energia renovável. A energia eólica se apresenta como uma opção crucial para a diversificação da matriz energética, desempenhando um papel fundamental na promoção da sustentabilidade. Ao reduzir significativamente os impactos ambientais, essa alternativa não somente contribui para preservar o ecossistema, mas também satisfaz a crescente demanda por energia e se harmoniza com a dinâmica da economia local (Gomes; Henkes, 2014).

De Sá *et al.* (2019), a energia eólica e solar, em particular, tem se destacado pelo rápido crescimento e potencial de suprir parte significativa da demanda nacional, enquanto a energia nuclear, embora ainda represente uma parcela menor, tem sido considerada uma alternativa estratégica para garantir a estabilidade do fornecimento.

A energia potencial elétrica possui um papel crucial e é empregada no cotidiano humano, embora sua produção envolva processos que, dependendo da abordagem adotada, podem causar danos ambientais. Esse é o caso da geração de energia elétrica por meio da queima de combustíveis fósseis (Silva; Mariani, 2017).

A conversão de energia térmica em eletricidade, que muitas vezes envolve a queima de combustíveis, resulta na emissão de dióxido de carbono, contribuindo consideravelmente para o aquecimento global, apesar de ser uma opção frequentemente utilizada em momentos de crise energética (Gomes; Henkes, 2014).

A categorização da energia como renovável ou não renovável baseia-se na capacidade da fonte primária de se regenerar ou recuperar, determinando se é esgotável ou não. Exemplos de fontes renováveis incluem o sol, o vento, a água, a biomassa, as ondas, as marés e a energia geotérmica. Já as fontes não renováveis compreendem o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e os combustíveis nucleares (Gannoum, 2014). Conforme figura 2

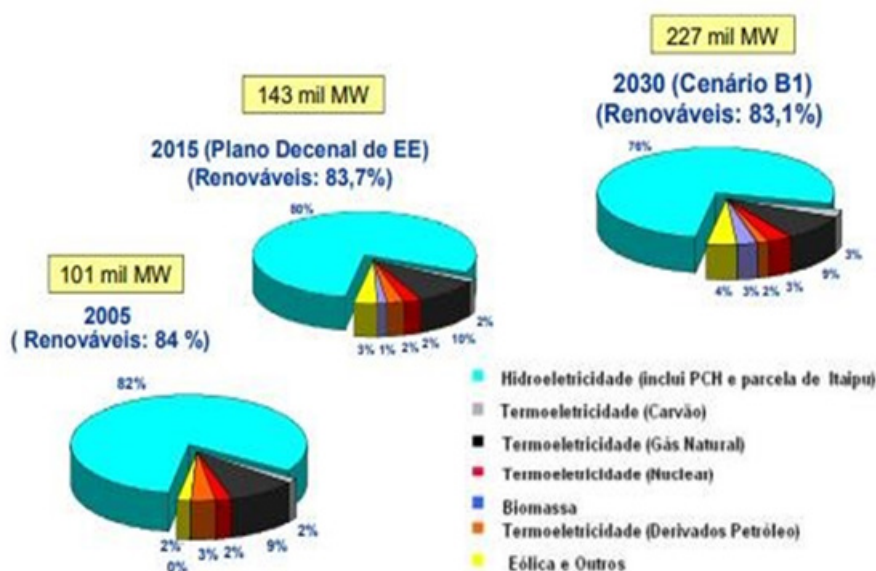


Figura 2. Projeção da Matriz Energética Elétrica 2005 -2030

Fonte: Adaptado Oliveira (2019).

A preferência pela energia hidrelétrica no Brasil se deve, em grande parte, à abundância de recursos naturais, como rios e bacias hidrográficas, que oferecem condições favoráveis para a implementação desse tipo de empreendimento. No entanto, essa dependência também gera desafios, especialmente em períodos de seca, que podem comprometer a capacidade de geração e a estabilidade do sistema elétrico nacional.

É importante ressaltar que a matriz elétrica de um país se refere ao conjunto de fontes de energia utilizadas exclusivamente para a geração de eletricidade. No Brasil, além da energia hidrelétrica, fontes como a eólica, solar e biomassa têm ganhado espaço nos últimos anos, em um esforço para diversificar a matriz e reduzir a vulnerabilidade às variações climáticas, fortalecendo a segurança energética do país (Oliveira, 2019).

2.2.1 Energia eólica e seu aproveitamento

A energia eólica, por exemplo, é uma fonte limpa de energia empregada em muitas partes do mundo. No Brasil, a promoção de energias limpas visa tanto questões ambientais quanto a diversificação das fontes de energia elétrica. O país se destaca como produtor significativo de energia eólica, beneficiando-se de apoio governamental nesse sentido (Silva, 2018).

A história da energia eólica no Brasil teve início na década de 1980 com o Projeto Debra (acrônimo formado pelas iniciais de Deutschland e Brasil), uma parceria entre os governos brasileiro e alemão, através do Centro Aeroespacial da Alemanha

DEVL. Esse projeto foi impulsionado por estudos realizados pelo Centro de Tecnologia Aeroespacial, que identificou o potencial eólico para a geração de energia elétrica no Nordeste brasileiro (Fernando, 2022).

A primeira turbina eólica do Brasil foi instalada em julho de 1992, na ilha de Fernando de Noronha, representando até 10% da energia gerada na ilha naquela época. Posteriormente, o Governo Federal instituiu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002, com o propósito de promover o uso de fontes renováveis. Inicialmente, o programa visava gerar mais de 3.000 MW de energia elétrica a partir

dessas fontes, contribuindo para diversificar a matriz energética brasileira.

Além dos principais componentes, como a torre, o gerador e as pás, o aerogerador possui uma série de outros dispositivos elétricos e mecânicos que auxiliam no seu funcionamento. Esses componentes podem variar conforme o modelo e o tipo de aerogerador utilizado, adaptando-se às condições específicas de vento e às necessidades do sistema de geração (Pinheiro; Gomes; Beletti, 2021).

Classificação	Diâmetro (m)	Área (m ²)	Potência, até (kW)
Pequeno	0,0 a 8,0	0,00 a 50,0	20
	8,1 a 11,0	50,1 a 100,0	25
	11,1 a 16,0	100,1 a 200,0	60
Médio	16,1 a 22,0	200,1 a 400,0	130
	22,1 a 32,0	400,1 a 800,0	310
	32,1 a 45,0	800,1 a 1.600,0	750
Grande	45,1 a 64,0	1.600,1 a 3.200,0	1.500
	64,1 a 90,0	3.200,1 a 6.400,0	3.100
	90,1 a 128	6.400,1 a 12.800	6.400

Tabela 2. Geradores Comerciais no Mercado

Fonte: Adaptado Silva (2018).

A Tabela acima apresenta a classificação e a capacidade dos geradores comerciais existentes no mercado. Por ter sua utilização para uma grande diversidade de aplicações a faixa de potência disponível é bastante ampla. Como toda tecnologia de geração de energia tem seus prós e seus contras, a geração de eletricidade através da utilização da energia dos ventos não é diferente.

De acordo com informações da ANEEL (2018), a capacidade mundial de energia eólica aumentou impressionantes 1.155% entre 1997 e 2007, passando de 7,5 mil para 93,8 mil MW. O ano de 2007 se destacou como um período extremamente ativo na produção de energia a partir do vento, com a tendência se mantendo em 2008. Dados de Silva (2018) indicam que há cerca de 30.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade total de 13.500 MW/h.

No Brasil, a exploração de recursos eólicos era tradicionalmente focada no uso de cata-ventos para o bombeamento de água. No entanto, diversos estudos apontam um potencial não explorado para geração de energia elétrica em diferentes regiões do país (Fernando, 2022). A participação da energia eólica na matriz energética brasileira teve início em 2009, representando apenas 0,2%. Em 2017, esse número cresceu mais de 30 vezes, atingindo uma participação de 6,8%, equivalente a um crescimento médio anual de pouco mais de 55% (Bernardy, 2018).

O vento surge das discrepâncias na pressão atmosférica entre distintas áreas e é influenciado por fatores locais, como a topografia da região e a rugosidade do solo. Tais disparidades de pressão têm origem térmica e estão ligadas à radiação solar, assim como aos processos de aquecimento das massas de ar. Elas emergem de influências naturais, incluindo fatores como continentalidade, maritimidade, latitude e altitude (Gannoum, 2014).

No entanto para uma determinada faixa de utilização esse tipo de conversão de energia se torna bastante interessante e em consonância com as necessidades mais atuais do mercado que são a agilidade na implantação e a questão ambiental (Bernardy, 2018).



De acordo com Fernando (2022), a escolha do tipo de aerogerador a ser utilizado em um projeto de geração eólica depende de uma análise cuidadosa de diversos fatores. Entre os mais importantes, destacam-se as condições climáticas da região, como a intensidade e constância dos ventos, e a finalidade da aplicação, que pode variar desde o uso residencial até a integração ao sistema elétrico nacional.

Por outro lado, para o atendimento de pequenas comunidades ou instalações de médio porte, são utilizados aerogeradores com capacidades de alguns kW. Já em projetos de geração em larga escala, voltados para integração ao sistema elétrico nacional, os aerogeradores empregados possuem potência superior a 100kW, contribuindo significativamente para a matriz energética do país (Gannoum, 2014). Conforme figura 3 a seguir

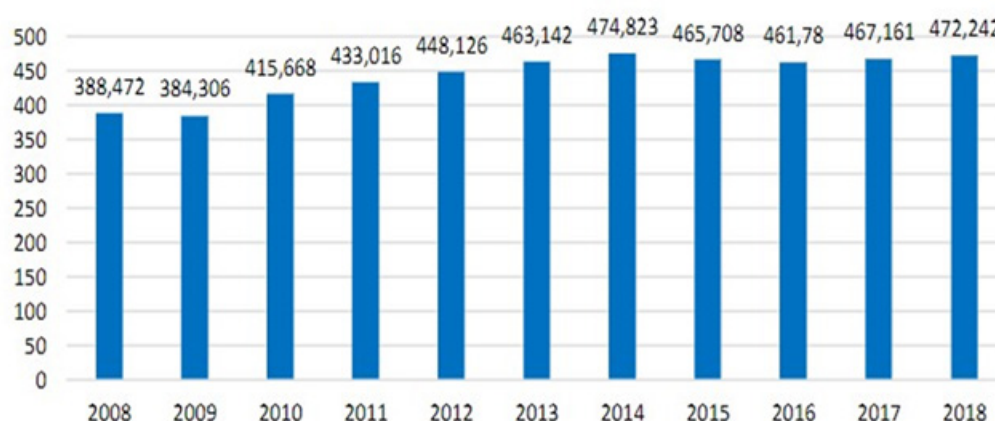


Figura 3. Consumo anual de energia elétrica no Brasil em GWh

Fonte: Adaptado Fernando (2022).

Segundo Pereira (2016), a energia eólica é obtida a partir do movimento do ar, sendo o vento a sua principal fonte de aproveitamento. Historicamente, essa energia foi utilizada para atividades como a moagem de grãos e o bombeamento de água. Com o avanço das tecnologias, seu uso expandiu-se para a geração de energia elétrica, tornando-se uma importante alternativa para a matriz energética em várias partes do mundo.

No contexto brasileiro, o investimento em energia eólica tem experimentado um crescimento significativo ao longo dos anos, contribuindo com aproximadamente 9,7% da produção total de energia em 2019. No âmbito da crise energética do país, a energia eólica apresenta vantagens notáveis, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias para parques eólicos. A projeção para 2022 indica uma capacidade instalada de 17,6 GW (Richter, 2024).

De acordo com Fernando (2022), a aplicabilidade da energia eólica abrange uma ampla gama de categorias de consumo. Para atender pequenas demandas, como consumo residencial em áreas isoladas, são utilizados aerogeradores de baixa potência, geralmente em torno de 1kW. Esses sistemas são capazes de suprir as necessidades energéticas de uma residência ou pequena propriedade, tornando-se uma solução ideal para locais sem acesso à rede elétrica convencional, além de promover a independência energética.

A região Nordeste do Brasil tem se destacado como líder na produção de energia eólica, representando cerca de 89% da energia gerada na região em 2019, com uma produção diária de 8.650 MW. Esses números refletem o mais alto índice de fornecimento de energia proveniente do vento, estabelecendo-a como um exemplo notável (Abeólica, 2024).

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica (2024), o Nordeste brasileiro abriga a maioria dos parques eólicos do país, contando com aproximadamente 602 par-

ques eólicos e 7.500 aerogeradores em 12 estados. O Sul do Brasil possui 95 parques eólicos, enquanto um parque está localizado no Rio de Janeiro (Abeólica, 2024).

No território brasileiro, o estado que se destaca como o principal produtor de energia eólica é o Rio Grande do Norte, que, conforme levantamento de dados, possuía em 2019 cerca de 151 parques eólicos com uma capacidade total de 4 GW. A Bahia acompanha essa liderança com 154 parques eólicos e capacidade de 3,9 GW, seguida pelo Ceará com 79 parques e capacidade de 2 GW (Richter, 2024).

Segundo Pereira (2016), a energia eólica é considerada uma fonte de energia limpa, destacando-se por sua abundância e origem renovável. Uma de suas vantagens ambientais significativas é a ausência de poluentes nocivos ao meio ambiente, uma vez que não depende da queima de combustíveis fósseis, principais emissores de poluentes como o dióxido de carbono (CO₂), responsável pelo aquecimento global e danos à camada de ozônio.

De acordo com Silva e Mariani (2017), o impacto visual é uma barreira significativa para a aprovação de projetos eólicos. Avanços tecnológicos permitiram a integração estética dos parques eólicos ao ambiente circundante, suavizando a paisagem. Turbinas com três pás se movem mais lentamente do que aquelas com duas, reduzindo tanto os impactos visuais quanto sonoros. Isso ressalta a importância da consideração cuidadosa desses fatores na construção de parques eólicos.

A energia eólica poderia complementar o regime pluvial do país, especialmente em períodos de crise hídrica, aumentando a geração de energia durante ventos intensos. Ele também destaca que a conscientização pública favorecerá o futuro promissor da energia eólica, tornando-a uma opção mais competitiva no mercado à medida que os custos diminuem ao longo do tempo (Gannoum, 2014).

De acordo com Richter (2024), em 2019, a região Nordeste do Brasil possuía uma capacidade de energia eólica de aproximadamente 500 gigawatts, o que é suficiente para suprir três vezes a demanda energética de todo o país. A geração de energia eólica no Nordeste superava a produção proveniente de hidrelétricas, gás natural e combustíveis fósseis.

No ranking das fontes de energia produzidas no Brasil em 2019, a energia eólica ocupava a quarta posição. No entanto, o Nordeste sozinho contribuía com cerca de 85% de toda a energia eólica gerada no país. Dos 534 parques de geração de energia eólica, 430 estavam localizados na região Nordeste (Richter, 2024).

A produção de energia eólica no Nordeste brasileiro era favorecida por fatores como tecnologias de construção avançadas e previsões meteorológicas precisas. Devido à sua competitividade, a região Nordeste atraía investimentos significativos para a geração de energia eólica (Carvalho, 2021).

Além da geração de energia eólica, o Nordeste se destacava como um polo de fabricação de componentes para a indústria eólica, impulsionando a economia regional. A produção e venda de aerogeradores também tinham potencial para exportação, contribuindo para a adoção global dessa forma de energia limpa (Silva, 2018).

A região Nordeste aproveitava sua localização estratégica, onde pontos com ventos fortes eram abundantes. A capacidade de geração de energia eólica na região superava outras partes do país devido às velocidades dos ventos mais elevadas, resultando em maior fator de capacidade, inclusive comparável aos parques eólicos da Europa (Gomes; Henkes, 2014).



A geração de energia eólica dependia da presença de ventos estáveis com intensidade, velocidade e direção consistentes. Tanto a região Sul quanto o Nordeste do Brasil apresentavam condições propícias para a produção de energia eólica devido à disponibilidade desses tipos de ventos (Richter, 2024).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada destacou a importância da energia eólica como uma alternativa viável e promissora para a diversificação da matriz energética brasileira. Ao utilizar recursos renováveis, como o vento, essa fonte de energia contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito estufa. O Brasil, com seu vasto potencial eólico, especialmente em regiões litorâneas, possui condições favoráveis para expandir significativamente sua capacidade de geração de energia eólica.

À medida que o Brasil busca diversificar ainda mais sua matriz energética e reduzir sua dependência de fontes não renováveis, a energia eólica se posiciona como um componente crucial dessa estratégia. A contínua pesquisa e desenvolvimento nesse setor podem aprimorar a eficiência dos aerogeradores, diminuir custos e resolver desafios técnicos, tornando-a ainda mais competitiva em relação a outras fontes de energia.

Portanto, as considerações finais ressaltam que a adoção da energia eólica como alternativa na geração de energia elétrica no Brasil é uma iniciativa que deve ser incentivada e ampliada. No entanto, é fundamental que essa expansão seja realizada de forma planejada e sustentável, considerando os aspectos ambientais, sociais e econômicos, a fim de garantir um futuro energético mais limpo, resiliente e seguro para o país.

Em síntese, este trabalho alcançou o objetivo geral de investigar e analisar abordagens sistemáticas para o problema em questão, ao cumprir os objetivos específicos de revisar a literatura, descrever estratégias para questão da energia eólica e contribuir para o avanço do conhecimento na área.

Como proposta para trabalhos futuros, seria interessante aprofundar estudos sobre as tecnologias emergentes na geração eólica, como o uso de turbinas flutuantes e a otimização de parques eólicos offshore. Além disso, investigações sobre políticas públicas que incentivem a expansão da energia eólica, associadas ao desenvolvimento de linhas de transmissão mais eficientes e o fortalecimento da rede elétrica, são fundamentais.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **Infográfico 10GW Eólica, a energia do futuro**. São Paulo, 2016.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 6ª edição. 2018.
- BERNARDY, A. **Análise da matriz elétrica brasileira**: Histórico e tendências. 2018. 53 fls. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, ARA-RANGUÁ, 2018.
- CAVALARI, Gabriel Margato. **Avaliação de perdas elétricas devido ao ponto de interconexão do sistema de geração eólica na rede elétrica**. 2016. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, 2016.
- CARVALHO, B. **Especialistas pedem mais investimento em energia eólica no país**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/especialistaspedem-mais-investimento-emenergia-eolica-no-pais/>. Acesso em: 13 fev. 2024.

DE SÁ, Raissa Jennifer da Silva et al. Energias renováveis: energia solar fotovoltaica e energia eólica. **Multidisciplinary Reviews**, v. 2, p. e2019018-e2019018, 2019.

FERNANDO, Simão Bernardo. **Panorama da Energia Eólica no Brasil**: Uma Análise da Expansão da Capacidade Instalada na Matriz Elétrica. 2022. 51f. Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-Ceará, 2022.

GANNOUM, E. S. **O Desenvolvimento da Indústria Eólica no Brasil**: aspectos de inserção, consolidação e sustentabilidade. 2015. Cadernos Adenauer XV (2014) nº 3.

GOMES, L. E. B.; HENKES, J. A. **Análise da energia eólica no cenário elétrico**: aspectos gerais e indicadores de viabilidade econômica. Estudo de caso – Universidade do Sul de Santa Catarina (Unisul), Florianópolis. 2014.

OLIVEIRA, Larissa Pena de. **Estudo de viabilidade da implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica em uma residência**. 2019.

PINHEIRO, V. M., GOMES, L. C., de Oliveira, C. A., & BELETTI, M. A. (2021). Análise do setor de energia eólica no Brasil. **Revista Científica UMC**, 6(1). Recuperado de <https://seer.umc.br/index.php/revistaumc/article/view/976>

PALI, Bahadur Singh; VADHERA, Shelly. Renewable energy systems for generating electric power: A review. In: **2016 IEEE 1st international conference on power electronics, intelligent control and energy systems (ICPEICES)**. IEEE, 2016. p. 1-6.

PEREIRA, Maurício Vieira da Rocha. **Impacto da altura de aerogeradores sobre a velocidade do vento, energia, efeito de esteira e intensidade de turbulência**: Estudos de caso em três projetos eólicos localizados no Brasil. 2016.

SILVA, J. **Energia eólica**. 2018. Disponível em: <https://www.fundaj.gov.br/index.php/a-questao-energetica/10859-nordeste-gera-85da-energia-eolica-do-brasil>. Acesso em: 02 de abr. de 2024.

SILVA, N. N. R.; MARIANI, L. **Eficiência energética e qualidade de energia**. Londrina: Educacional S.A, 2017. 208 p.



Resumo

Este artigo investiga a importância da geração de energia limpa por meio da tecnologia fotovoltaica, frente à crescente demanda energética e às preocupações ambientais globais. A tecnologia fotovoltaica, que converte diretamente a luz solar em eletricidade por meio de células fotovoltaicas compostas por materiais semicondutores, é destacada como uma solução inovadora e sustentável. O objetivo geral da pesquisa é compreender o papel da tecnologia fotovoltaica na geração de energia limpa e renovável. Utilizando uma abordagem qualitativa descritiva, com base em revisão de literatura de estudos dos últimos 10 anos, o trabalho examina os aspectos técnicos dos sistemas fotovoltaicos e seus impactos socioeconômicos, ambientais e tecnológicos. A análise demonstra que a energia fotovoltaica contribui significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa, além de promover desenvolvimento econômico por meio da criação de empregos nas áreas de fabricação, instalação e manutenção de sistemas. Conclui-se que essa tecnologia desempenha um papel essencial na transição para um modelo energético mais sustentável, ao mesmo tempo em que impulsiona inovações em indústrias relacionadas à energia limpa.

Palavras-chave: Energia limpa. Sistema fotovoltaico. Geração de energia.

Abstract

This paper investigates the importance of clean energy generation through photovoltaic technology, in the face of growing energy demand and global environmental concerns. Photovoltaic technology, which directly converts sunlight into electricity through photovoltaic cells composed of semiconductor materials, is highlighted as an innovative and sustainable solution. The overall objective of the research is to understand the role of photovoltaic technology in the generation of clean and renewable energy. Using a descriptive qualitative approach, based on a literature review of studies from the last 10 years, the work examines the technical aspects of photovoltaic systems and their socio-economic, environmental and technological impacts. The analysis demonstrates that photovoltaic energy contributes significantly to the reduction of greenhouse gas emissions, in addition to promoting economic development through the creation of jobs in the areas of manufacturing, installation and maintenance of systems. It is concluded that this technology plays an essential role in the transition to a more sustainable energy model, while also driving innovations in industries related to clean energy.

Keywords: Clean energy. Photovoltaic system. Power generation.



1. INTRODUÇÃO

A geração de energia é um pilar essencial para o desenvolvimento humano e econômico, sendo crucial para suprir as necessidades crescentes da sociedade moderna. No entanto, esse processo muitas vezes resultou em impactos ambientais significativos, decorrentes do uso intensivo de fontes não-renováveis de energia, como os combustíveis fósseis. Diante das preocupações ambientais globais e da busca por alternativas sustentáveis, a tecnologia fotovoltaica emergiu como uma solução promissora para a geração de energia limpa.

A tecnologia fotovoltaica se baseia na conversão direta da luz solar em eletricidade, por meio de células fotovoltaicas compostas geralmente por materiais semicondutores. Esse processo oferece inúmeras vantagens, destacando-se por ser uma fonte de energia renovável, abundante e virtualmente inesgotável. Neste contexto, este projeto de pesquisa se propõe a explorar a geração de energia limpa por meio da tecnologia fotovoltaica, analisando não apenas os aspectos técnicos e científicos envolvidos, mas também os impactos socioeconômicos e ambientais de sua adoção.

A pesquisa e implementação da tecnologia fotovoltaica impulsionam o avanço tecnológico em áreas como materiais semicondutores, armazenamento de energia e eficiência de conversão. Isso pode estimular a inovação em outras indústrias e criar oportunidades econômicas, incluindo empregos na fabricação, instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos. As contribuições acadêmicas na geração de energia limpa por meio da tecnologia fotovoltaica têm sido fundamentais para impulsionar a transição global para fontes sustentáveis de energia.

Dado o contexto global de urgência em relação à sustentabilidade e às crescentes dificuldades decorrentes das mudanças climáticas e da escassez de recursos naturais, surge a necessidade de explorar abordagens sistemáticas. Qual é o impacto da geração de energia limpa por meio da tecnologia fotovoltaica no ramo de suprimento energético?

O objetivo geral da pesquisa foi compreender o papel desempenhado pela aplicação da tecnologia fotovoltaica na geração de energia limpa e renovável. Já os objetivos específicos foram: Descrever os principais aspectos dos sistemas fotovoltaicos e pôr fim a contribuição desse tipo de geração de energia para o meio ambiente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Figuras e tabelas não devem possuir títulos (cabeçalhos), mas sim legendas. Para melhor visualização dos objetos, deve ser previsto um espaço simples entre texto-objeto e entre legenda-texto. As legendas devem ser posicionadas abaixo das Figuras e Tabelas. Esses objetos, bem como suas respectivas legendas, devem ser centralizados na página.

2.2 Resultados e Discussão

De acordo com Ribeiro e Silva Filho (2024), a Terra possui uma abundante e aparentemente inesgotável fonte de energia solar, embora se reconheça que, eventualmente, os gases que alimentam o sol se esgotarão. No entanto, essa eventualidade está tão distante

que a energia solar é considerada virtualmente inesgotável. No entanto, apenas uma fração limitada dessa energia é atualmente aproveitada, o que pode ser atribuído à falta de tecnologia adequada para uma exploração altamente eficiente.

Apesar dos esforços consideráveis da comunidade científica em direção ao aumento da eficiência de conversão da energia solar em outras formas de energia, combinados com os avanços na nanotecnologia, as eficiências médias de conversão permanecem na faixa de 20 a 27%, um patamar que ainda não satisfaz plenamente as expectativas da comunidade científica (Santos, 2020).

De acordo com Baptista (2014), entre as diversas fontes de energia disponíveis, a radiação solar é reconhecida como a fonte primária de todas as outras formas de energia na Terra. Essa radiação solar pode ser capturada diretamente e utilizada de diversas maneiras. Além disso, as radiações solares podem ser convertidas em outras formas de energia, como energia eólica, carvão e petróleo.

2.2.1 Funcionamento do Sistema de Energia Solar

Segundo Moreira Junior e Souza (2020), o sistema de energia fotovoltaica, popularmente conhecido como energia solar, é responsável por converter a radiação solar em energia elétrica. Esse sistema permite que os próprios consumidores gerem sua própria eletricidade, utilizando a luz solar. A captação da energia é realizada por meio de painéis compostos por materiais semicondutores, como o silício, que transformam a radiação solar em eletricidade.

De acordo com Martins (2017), o efeito fotovoltaico ocorre quando materiais semicondutores realizam a conversão direta da luz solar em eletricidade, um fenômeno descoberto em 1839 por Edmond Becquerel. Durante esse processo, em uma estrutura formada por esses materiais, ocorre o surgimento de uma diferença de potencial elétrico nos extremos da estrutura. Esse efeito gera a diferença de potencial elétrico entre dois terminais, resultando na produção de energia.



Figura 1 Funcionamento da instalação do sistema fotovoltaico na residência

Fonte: Reis et al. (2019).

Segundo Santos (2024), o principal componente do sistema fotovoltaico é a célula solar, cuja função é captar a luz solar e convertê-la em energia elétrica de corrente contínua. As células mais comuns no mercado são fabricadas a partir de silício, e cada uma gera uma tensão elétrica específica. Ao associá-las em série ou em paralelo, é possível obter os valores de tensão desejados, formando o que chamamos de painel solar.

De acordo com Souza (2019), para que a energia gerada seja utilizada adequadamente, ela passa por um inversor, que converte a corrente contínua em corrente alternada, possibilitando sua distribuição para diversos locais, como indústrias, residências ou outras aplicações.

De acordo com o site da ANEEL (2018), o Brasil tem experimentado um crescimento notável no número de sistemas de energia renovável devido à liberalização para consumidores ativos. Em 2012, o país contava com apenas sete sistemas solares instalados. No entanto, os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) revelam que esse número saltou para 110.997 sistemas no ano de 2018, abrangendo tanto mini quanto micro geradores.

Para Reis *et al.* (2019), as estimativas indicam que o Brasil terá aproximadamente 887 mil sistemas de energia solar conectados à rede elétrica. Esta projeção representa um significativo avanço em relação aos anos anteriores e evidencia a crescente aceitação e instalação de tecnologias solares no país. A Figura 2 ilustra a projeção em megawatts (MW) de painéis solares no Brasil, destacando o impacto crescente dessa fonte de energia renovável no cenário energético nacional.

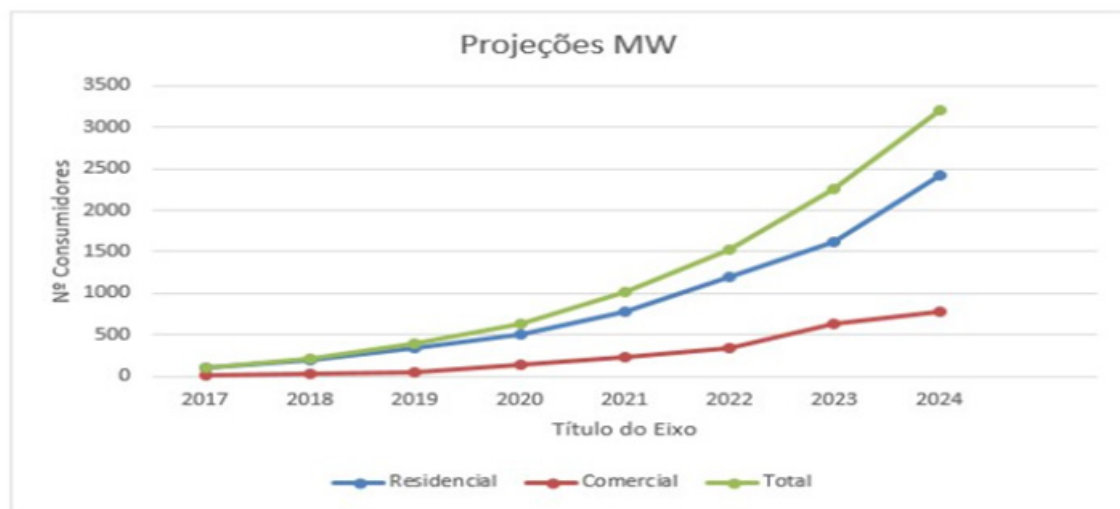


Figura 2. Projeção de MW no país de painéis solares.

Fonte: Adaptado Reis *et al.* (2019).

De acordo com Messenger *et al.* (2017), a expansão continuou a avançar, com uma previsão de que, em 2020, o total de painéis solares instalados chegaria a 174 mil. Este aumento substancial reflete uma tendência crescente no uso de energia solar como uma alternativa sustentável para a geração de eletricidade. O crescimento contínuo e a adoção desses sistemas têm sido impulsionados por políticas favoráveis e incentivos para a energia renovável.

Souza, Moura e Queiroz (2016) apontam que a prática comum de armazenar excedentes de eletricidade é realizada por meio de baterias e dispositivos semelhantes, permitindo a utilização da energia durante períodos de baixa tensão na rede elétrica ou à noite. Esse armazenamento é especialmente útil para garantir o fornecimento contínuo de eletricidade.

de quando a produção de energia solar é insuficiente, como em horários de baixa insolação ou durante a noite.

A Figura 3 ilustra a montagem de um painel fotovoltaico, fornecendo uma visão detalhada sobre a configuração e o funcionamento desses sistemas. Esta representação visual é útil para entender a estrutura e os componentes envolvidos na instalação de painéis solares, bem como a integração com as soluções de armazenamento de energia (De Castro *et al.*, 2020).



Figura 3. Painel fotovoltaico sendo montado

Fonte: Adaptado Reis *et al.* (2019).

Segundo Zilles *et al.* (2016), a montagem de um painel fotovoltaico envolve várias etapas para garantir seu funcionamento eficiente. O processo começa com a avaliação do local, onde é fundamental escolher uma área que receba luz solar direta e esteja livre de sombras. Após isso, é necessário instalar a estrutura de suporte no telhado ou na superfície escolhida, assegurando que esteja inclinada e orientada corretamente.

De acordo com Reis *et al.* (2019), em seguida, os painéis fotovoltaicos são fixados na estrutura, conectando-os em série ou em paralelo conforme o projeto do sistema. A fiação deve ser cuidadosamente conectada, e é importante instalar disjuntores e fusíveis para proteção contra sobrecargas.

Depois de instalar os painéis, o inversor deve ser montado em um local adequado, geralmente próximo ao painel elétrico e bem ventilado. A conexão dos fios dos painéis ao inversor e a conexão do inversor ao sistema elétrico da residência ou à rede elétrica são etapas cruciais (Moreira Júnior; Souza, 2020).

De acordo com Ribeiro e Silva Filho (2024), a quantidade de energia que passa através de uma célula fotovoltaica está diretamente proporcional ao nível de radiação solar recebido ao longo do dia. Assim, quando a radiação solar diminui, a produção de energia elétrica pela célula fotovoltaica também é reduzida. Esta relação é ilustrada na Figura 4, que demonstra como as variações na radiação solar afetam a geração de energia pelas células fotovoltaicas.

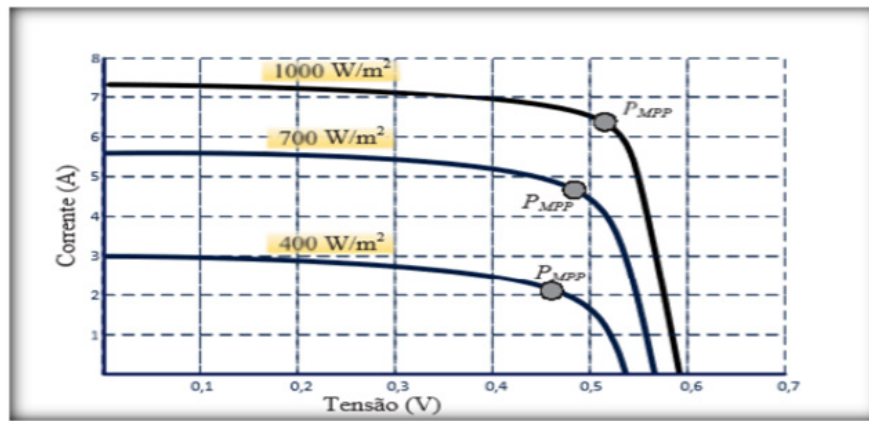


Figura 4. Curva tensão x corrente elétrica da célula fotovoltaica

Fonte: Adaptado Reis et al. (2019).

A adoção de baterias para o armazenamento de energia solar é uma medida eficiente para lidar com a variabilidade na geração de energia fotovoltaica. Contudo, é importante observar que essa solução pode reduzir o potencial de sustentabilidade da energia solar e aumentar os custos associados à instalação dos módulos fotovoltaicos. O investimento em baterias pode elevar o custo total do sistema solar, o que deve ser considerado ao planejar a implementação de tais tecnologias (Naruto, 2017).

Segundo Tiggemann (2015), é possível conectar módulos fotovoltaicos diretamente a cargas de corrente contínua, como lâmpadas, motores e alguns aparelhos de medição. No entanto, os equipamentos que operam com corrente contínua enfrentam limitações no mercado.

Tiggemann (2015) destaca que, idealmente, a onda gerada pelo inversor deveria ter formato senoidal. Contudo, a maioria dos inversores disponíveis no mercado produz ondas em formato quadrado ou trapezoidal, uma estratégia adotada para reduzir os custos de produção. Esses tipos de inversores tendem a gerar um alto nível de ondas harmônicas, resultando em menor eficiência.

Os inversores geralmente operam com alta eficiência e de forma bastante constante. No entanto, quando os painéis solares fornecem menos de aproximadamente 25% da capacidade nominal do inversor, sua eficiência tende a diminuir. Essa variação na eficiência é ilustrada pelo gráfico da curva de eficiência do inversor Fronius Primo, conforme apresentado na ficha técnica do fabricante (Martins, 2017)

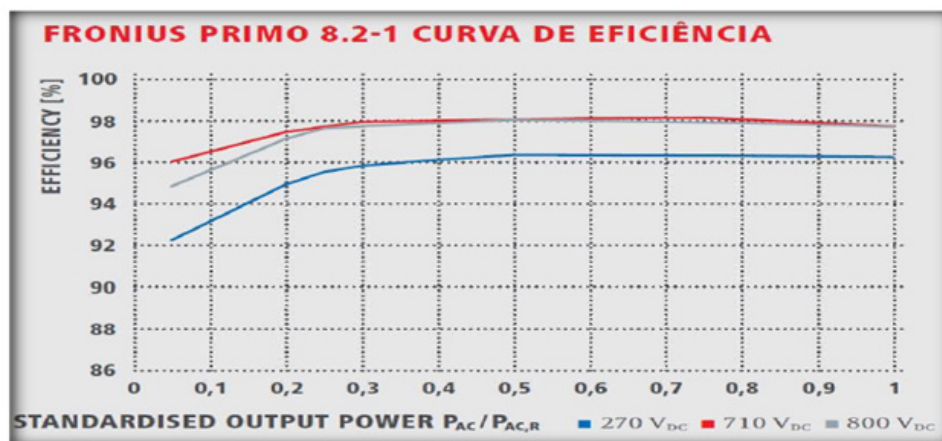


Figura 5- Curva de eficiência de um Inversor

Fonte: Adaptado Tiggemann (2015).

2.2.2 Sistemas Fotovoltaicos em Conexão à Rede de Distribuição

O sistema de conexão à rede elétrica, conhecido como “on grid”, é uma infraestrutura que viabiliza a integração significativa da energia solar fotovoltaica (FV) na rede elétrica nacional. Essa tecnologia é de grande importância para padronizar a integração de sistemas fotovoltaicos (Aneel, 2018).

Na geração fotovoltaica, existem dois tipos principais de sistemas: o “off grid”, que opera de maneira isolada e está conectado a um banco de baterias, e o “on grid”, que está diretamente conectado à rede elétrica da concessionária. No sistema “on grid”, o excesso de energia produzido pelo sistema fotovoltaico é injetado na rede da concessionária, e o consumidor recebe energia da rede quando sua geração não é suficiente para cobrir a demanda (Aneel, 2018).

No contexto do sistema de geração fotovoltaica conectado à rede elétrica, também chamado de “on grid”, as conexões elétricas são realizadas em série para alcançar uma tensão de saída desejada e/ou em paralelo para atingir a capacidade desejada. Os cabos condutores que transportam a corrente dos painéis solares podem ser feitos de materiais condutores como prata, cobre ou outros metais condutores não magnéticos (Zilles *et al.*, 2016).

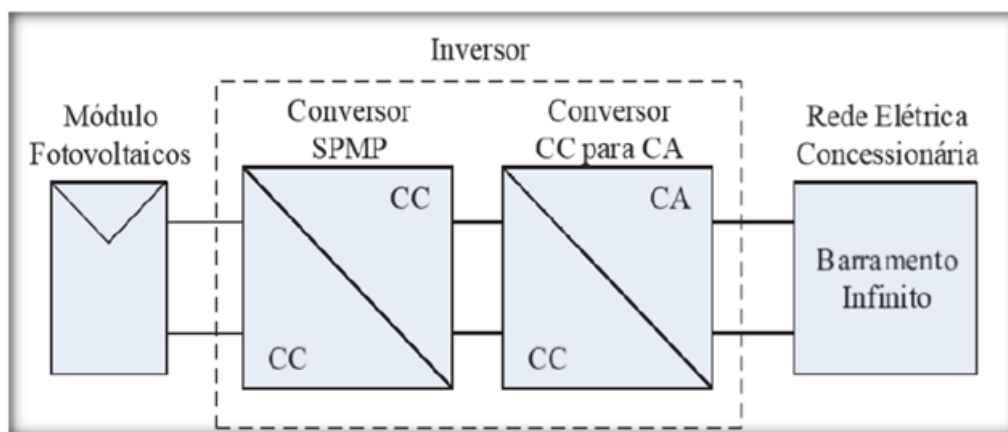


Figura 6- Modelo de sistema fotovoltaico em conexão à rede

Fonte: Adaptado Tiggemann (2015).

Em sistemas terrestres de energia solar, é comum utilizar conectores MC3 (mais antigos) ou MC4 nos painéis solares para facilitar conexões seguras e resistentes às condições climáticas adversas. Em casos de sombreamento parcial de um painel, diodos podem ser incorporados ou utilizados externamente para maximizar a eficiência da seção iluminada do painel (Zilles *et al.*, 2016).

Durante o ano de 2016, foram adicionados cerca de 75 GW de capacidade fotovoltaica, equivalendo à instalação de mais de 31.000 painéis solares por hora. Esse crescimento se deve à crescente competitividade da energia solar fotovoltaica, que se destaca pelo potencial de mitigar questões-chave como poluição, emissões de CO₂ e dependência energética (Naruto, 2017).

No entanto, é crucial destacar que incentivos e regulamentações governamentais ainda desempenham um papel fundamental nesse mercado. Os principais países em capacidade total em 2014 foram Alemanha, China, Japão, Itália e Estados Unidos, enquanto em 2016 foram China, Japão, Alemanha, Estados Unidos e Itália (Messenger *et al.*, 2017).

No entanto, quando consideramos a capacidade fotovoltaica per capita, a Alemanha

mantém a liderança, seguida por Japão, Itália, Bélgica e Austrália/Grécia. Na Europa, tanto Alemanha quanto Itália se destacam, com a participação da eletricidade proveniente de sistemas fotovoltaicos ultrapassando 20% e a produção de energia solar superando 20 TWh em 2014. Embora a União Europeia (UE) tenha sido a primeira região a ultrapassar 100 GW em 2016, a Ásia rapidamente a superou (Messenger *et al.*, 2017).

De acordo com De Brito, Dos Santos e Shibas, (2023), o ângulo de inclinação dos painéis fotovoltaicos é fundamental para otimizar a captura de energia solar e, consequentemente, a eficiência do sistema. Idealmente, o ângulo deve ser próximo à latitude do local de instalação, o que ajuda a maximizar a exposição solar ao longo do ano. Em regiões com variações sazonais significativas, ajustar o ângulo conforme a estação pode melhorar a produção de energia; um ângulo mais baixo pode ser vantajoso no verão, enquanto um ângulo mais alto pode ser mais eficaz no inverno.

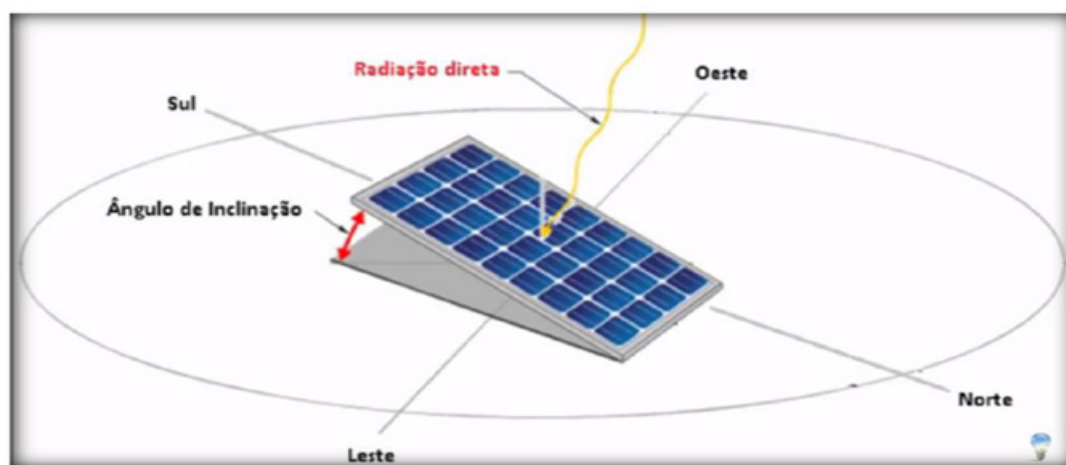


Figura 7. Modelo de sistema ângulo de inclinação

Fonte: Adaptado Tiggemann (2015).

De acordo com Reis *et al.* (2019), além do ângulo, a orientação dos painéis também é crucial, geralmente voltada para o norte no hemisfério sul e para o sul no hemisfério norte. É importante considerar a presença de obstáculos e possíveis sombras, como árvores ou edifícios, ao definir o ângulo de inclinação, para garantir que os painéis recebam a maior quantidade possível de luz solar direta. Esses ajustes ajudam a maximizar a eficiência do sistema fotovoltaico e o retorno sobre o investimento.

2.2.2 Contribuição da Energia Fotovoltaica para o Meio Ambiente

Em relação ao desafio de favorecer o meio ambiente por meio da geração de energia limpa, diversos estudos recentes destacam a ligação entre o aumento da implantação de fontes de energia renovável e a redução dos preços dos combustíveis. Esse benefício é significativo, uma vez que mesmo pequenas reduções nos preços podem resultar em enormes vantagens, dado o grande número de consumidores de eletricidade afetados (Almeida *et al.*, 2015).

Em uma pesquisa realizada por Almeida *et al.* (2015), vários estudos foram analisados para avaliar como o desenvolvimento de energias renováveis poderia impactar os preços do gás natural nos Estados Unidos. Os resultados indicaram que o aumento do uso de fontes de energia renovável, juntamente com maior eficiência energética, poderia pressionar para baixo os preços do gás natural.

Os autores concluíram que uma redução de 1% na demanda de gás natural devido ao aumento das energias renováveis resultaria em reduções médias de preço entre 0,8% e 2%, a longo prazo (Ribeiro; Silva Filho, 2024). No entanto, Almeida *et al.* (2015) também observaram que, a curto prazo, os consumidores em geral não veriam uma diminuição significativa em suas contas de energia elétrica; essas contas provavelmente permaneceriam estáveis. Ainda assim, os autores enfatizaram que a expansão da energia fotovoltaica poderia ajudar a mitigar a volatilidade dos preços de outras fontes de energia devido a choques de oferta.

Taylor (2020) destacou que os consumidores valorizam muito a confiabilidade de seu fornecimento de eletricidade, e diversos especialistas ressaltaram os potenciais benefícios da confiabilidade proporcionados pelo desenvolvimento de sistemas de geração elétrica mais distribuídos. Estudos concentraram-se especialmente nas causas e impactos econômicos dos apagões de energia, bem como no papel que a geração fotovoltaica poderia desempenhar na prevenção desses apagões.

Taylor (2020) estimou que os custos anuais dos apagões nos EUA eram cerca de US\$ 100 bilhões. No entanto, devido à imprevisibilidade dos apagões, o estudo não buscou quantificar completamente os benefícios totais de prevenção de apagões atribuíveis à geração fotovoltaica. No entanto, evidências sugerem que os custos econômicos dos apagões são substanciais e que as instalações fotovoltaicas, ao aumentar a estabilidade do sistema, podem proporcionar benefícios econômicos significativos.

Um exemplo notável foi o apagão de agosto de 2003, que resultou na perda de 62 mil MW de energia e afetou mais de 50 milhões de pessoas na região Nordeste dos EUA. Taylor (2020) indicou que, se houvesse uma disponibilidade de apenas 500 MW de capacidade fotovoltaica na época, o apagão poderia ter sido evitado. Esse potencial fotovoltaico disperso poderia ter reduzido a necessidade de transferências nacionais de energia, contribuindo para a mitigação das condições que levaram ao apagão.

A geração fotovoltaica desempenha um papel crucial na descarbonização da geração de eletricidade e na busca por objetivos de sustentabilidade. Ela não apenas reduz as emissões de gases de efeito estufa, mas também pode contribuir para a estabilidade do sistema elétrico, mitigando os custos econômicos associados aos apagões e promovendo preços mais baixos de energia (Moreira Júnior; Souza, 2020).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo de compreender o papel da tecnologia fotovoltaica na geração de energia limpa foi amplamente atendido. A pesquisa revelou que a energia fotovoltaica se destaca como uma solução sustentável e viável para a crescente demanda energética, promovendo impactos positivos tanto para o meio ambiente quanto para a economia.

Apesar do cumprimento dos objetivos principais, algumas limitações foram identificadas, principalmente no que tange à análise detalhada dos custos iniciais e dos desafios tecnológicos enfrentados por essa indústria. A implementação em larga escala de sistemas fotovoltaicos ainda requer investimentos significativos em infraestrutura e pesquisa, o que pode limitar sua adoção em regiões menos favorecidas.

Como recomendações para estudos futuros, sugere-se a realização de pesquisas voltadas para a análise econômica mais detalhada do custo-benefício da tecnologia fotovoltaica em diferentes contextos regionais. Outra sugestão é explorar novas abordagens para melhorar o armazenamento de energia e a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, o que



pode acelerar ainda mais a transição para fontes de energia limpa.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA et al. **Benefícios da utilização de energias renováveis**: Geração fotovoltaica. Paraná: Editora Paraná, 2015.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Micro e minigeração distribuída**: Sistema de compensação de energia elétrica. Brasília: 4. ed, 2018.
- BAPTISTA, Fernanda. **As implicações da implantação dos sistemas fotovoltaicos em local de baixa incidência solar**. II Congresso de Energia. Pará. 2014.
- DE BRITO, José Luiz Romero; DOS SANTOS, Mario Roberto; SHIBAO, Fabio Ytoshi. Gestão e valorização de resíduos de sistemas de geração de energia fotovoltaica. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 9, p. 16062-16083, 2023.
- DE CASTRO, Marcelo Stehling et al. Análise do impacto da geração fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 5, p. 3023-3042, 2020.
- MARTINS, André. **As particularidades da tecnologia fotovoltaica**. Rio. 2017.
- MESSENGER, Roger et al. **Photovoltaic systems globais engineering**. CRC press, 2017.
- MOREIRA JÚNIOR, O.; SOUZA, C. C. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha**. INTERAÇÕES, v. 21, n. 2, p. 379-387, 2020.
- NARUTO, Denise Tieko. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Monografia de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- REIS, Sofia Barbosa dos et al. **Gerenciamento de geração de energia fotovoltaica residencial: uma análise de viabilidade**. 2019.
- RIBEIRO, David Dutra; SILVA FILHO, Olympio Cipriano da. **Simulação de topologia de microinversor destinado à geração fotovoltaica on-grid**. 2024.
- SANTOS, Anderson. **Conhecendo a geração fotovoltaica**. São Paulo: Editora Mais. 2020.
- SOUZA, C.H.G.; MOURA, L.G.A.O.; QUEIROZ, L., **Energia solar fotovoltaica: um estudo da sua viabilidade no Brasil**, Simpósio de TCC e Seminário de IC, São Paulo – SP, 2016.
- TAVARES, P.J.; GALDINO, M., **Manual de engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 2014.
- TIGGEMANN, H., **Sistema de monitoramento remoto e controle de microrrede híbrida isolada**, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, 2015.
- TOLMASQUIM, M., **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. (Coord.). EPE: Rio de Janeiro, 2016.
- TAYLOR, William. **Blackout impacts on EUA economy. New economy**. V.19, n. 2, p. 112-139. 2020.
- ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Oficina de textos, 2016.



RELEVÂNCIA DAS SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO NO TRANSPORTE DE ENERGIA A ELÉTRICA

RELEVANCE OF HIGH VOLTAGE SUBSTATIONS IN THE TRANSPORT OF
ELECTRIC ENERGY

Pedro Lucas Costa dos Santos
Paulo José Pinto Souza

20

Resumo

O sistema de transmissão de energia elétrica desempenhou um papel fundamental na distribuição e disponibilidade de eletricidade para consumidores em larga escala. As subestações de alta tensão constituíram componentes essenciais desse sistema, sendo responsáveis pela conversão, controle e distribuição eficiente da energia elétrica em diferentes níveis de tensão. Essas instalações referiram-se a conjuntos de equipamentos de manobra, transformação e compensação de reativos, que controlaram o fluxo de energia em sistemas de potência, viabilizando a distribuição por meio de rotas alternativas. O objetivo geral do artigo consistiu em analisar a importância das subestações de alta tensão no sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil. Especificamente, buscou-se apresentar um contexto histórico da energia elétrica no país, detalhando os tipos de subestações, como elevadoras, abaixadoras e de distribuição, além de discutir os diferentes tipos de proteção aplicados nas linhas de transmissão. A metodologia adotada envolveu a revisão de literatura, com a coleta e análise de dados históricos e técnicos sobre a energia elétrica e as subestações de alta tensão. A pesquisa revelou que as subestações de alta tensão não apenas garantem a eficiência e a estabilidade do fornecimento de eletricidade, mas também desempenham um papel vital na proteção do sistema elétrico contra falhas, contribuindo para a segurança e a continuidade do serviço. Assim, concluiu-se que a modernização e a manutenção adequada dessas subestações são essenciais para o desenvolvimento sustentável do setor elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Artigo, Normas, Formatação.

Abstract

The electric power transmission system has played a fundamental role in the distribution and availability of electricity to large-scale consumers. High-voltage substations were essential components of this system, being responsible for the conversion, control and efficient distribution of electric power at different voltage levels. These facilities referred to sets of equipment for switching, transforming and compensating reactive power, which controlled the flow of energy in power systems, enabling distribution through alternative routes. The general objective of the article was to analyze the importance of high-voltage substations in the electric power transmission system in Brazil. Specifically, it sought to present a historical context of electric power in the country, detailing the types of substations, such as step-up, step-down and distribution, in addition to discussing the different types of protection applied to transmission lines. The methodology adopted involved a literature review, with the collection and analysis of historical and technical data on electric power and high-voltage substations. The research revealed that high-voltage substations not only ensure the efficiency and stability of electricity supply, but also play a vital role in protecting the electrical system against failures, contributing to safety and continuity of service. Thus, it was concluded that the modernization and proper maintenance of these substations are essential for the sustainable development of the Brazilian electricity sector. The abstract must have a maximum of 250 words, in Times New Roman font, size 12, justified, simple intervals between lines. The abstract must express, in a coherent and clear way, the main points of the article. It must be preceded by at least 3, and a maximum of 5 keywords, divided by comas, as this model presents.

Keywords: Article, Standards, Formatting

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão de energia elétrica desempenha um papel fundamental na distribuição e disponibilidade de eletricidade para consumidores em larga escala. As subestações de alta tensão são componentes essenciais desse sistema, desempenhando um papel essencial na conversão, controle e distribuição eficiente da energia elétrica em diferentes níveis de tensão.

Este estudo visa a contextualização do sistema elétrico de potência, com o intuito de explicar as classes de tensões de alta tensão e os sistemas de proteção utilizados para garantir a qualidade da energia elétrica, destacando as subestações de energia como objeto de pesquisa primordial.

As subestações referem-se a conjuntos de equipamentos de manobra, transformação e, ocasionalmente, compensação de reativos, utilizados para controlar o fluxo de energia em sistemas de potência, viabilizando sua distribuição por meio de rotas alternativas. Além disso, essas subestações incluem dispositivos de proteção capazes de identificar diferentes tipos de falhas que possam ocorrer no sistema, entre outros aspectos.

Nesse sentido, as subestações de alta tensão compõem sistemas que englobam geração, transmissão e distribuição de energia, requerendo modificações nas características da eletricidade. Assim, a relevância deste estudo reside em destacar como os sistemas de distribuição próprios têm se tornado fundamentais na apresentação da energia elétrica, especialmente no que diz respeito ao desempenho das atividades cotidianas de diversas empresas.

As subestações de alta tensão desempenham um papel crucial no sistema de transmissão de energia elétrica, atuando como pontos de conexão entre diferentes níveis de tensão, garantindo a eficiência e a estabilidade do fornecimento de eletricidade. Com base nas premissas mencionadas, o estudo identificou a seguinte pergunta norteadora. Qual é a importância das subestações de alta tensão no sistema de transmissão de energia elétrica?

O objetivo geral deste artigo é analisar a importância das subestações de alta tensão no sistema de transmissão de energia elétrica no Brasil. Especificamente, busca-se apresentar um contexto histórico da energia elétrica no país, detalhando os tipos de subestações, como elevadoras, abaixadoras e de distribuição, além de discutir os diferentes tipos de proteção aplicados nas linhas de transmissão.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, do tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e a elaboração de conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, *Scielo*, *Lilacs*, e no banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica, de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utili-



zado para a busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área de sistema de transmissão de energia, como Silva (2020), Sampaio (2024), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise.

2.2 Resultado e Discussão

O sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil é a fase final do processo de fornecimento de eletricidade, conectando a energia gerada nas usinas aos consumidores finais, como residências, comércios e indústrias. A eletricidade, após ser gerada em usinas hidrelétricas, termoeletricas, eólicas ou solares, é transmitida em alta tensão por longas distâncias até subestações, onde a tensão é reduzida para níveis adequados à distribuição local (Silva, 2020).

De acordo com Silva (2019), a partir dessas subestações, a energia é transportada por redes de média e baixa tensão, passando por transformadores que ajustam a tensão para níveis apropriados ao uso diário, como 220 V ou 127 V, dependendo da região do país. A distribuição da energia elétrica é realizada por concessionárias, que operam em áreas específicas do Brasil e são reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Essa regulação é fundamental para garantir que o serviço seja prestado com qualidade e que as tarifas cobradas sejam justas para os consumidores. Além disso, a ANEEL supervisiona as concessionárias para assegurar que a energia chegue a todos os cantos do país, inclusive em áreas remotas, onde a expansão da rede de distribuição representa um desafio significativo (Oliveira, 2024).

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é um conjunto de infraestruturas e equipamentos dedicados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Desde as usinas geradoras até os dispositivos de medição nas unidades consumidoras, esse sistema cobre todo o território nacional e foi regulamentado pela Portaria N° 3.214 em 1978 (Silva, 2016).

Dessa forma, o SEP visa essencialmente gerar energia elétrica em volumes suficientes para transportá-la e distribuí-la aos consumidores finais de maneira eficiente e econômica, levando em consideração tanto os custos financeiros quanto os impactos ambientais. O SEP é dividido em quatro partes principais: geração, transmissão, distribuição e consumo, que serão detalhadas posteriormente.

A obra de Vasconcelos (2017, p. 68) destaca que a geração de energia elétrica é obtida através da conversão de diversas fontes de energia em eletricidade. Esse processo pode ocorrer em múltiplas etapas, dependendo da fonte de energia utilizada. Por exemplo, no caso das energias hidráulica e térmica, a transformação acontece em duas etapas: inicialmente, uma máquina primária converte a energia da água ou do calor em energia cinética de rotação. Em seguida, essa energia cinética é convertida em energia elétrica por um gerador elétrico acoplado à máquina primária.

Essa explicação revela que a transformação de energia pode ser complexa, variando de acordo com a origem da energia, e é importante observar que existem várias fontes de energia além das mencionadas.

Além disso, Vasconcelos (2017, p. 68) diferencia as fontes de energia em renováveis e não renováveis. As fontes renováveis, como o próprio nome sugere, podem se regenerar ao longo do tempo, enquanto as não renováveis se esgotam à medida que são utilizadas. As fontes de energia renováveis incluem a energia hidráulica, biomassa (como cana-de-açúcar, lenha, carvão vegetal e lixo), eólica, solar, geotérmica, maremotriz, biogás e biodiesel.

As subestações de alta tensão são fundamentais no sistema de transporte de energia elétrica, pois elas desempenham o papel crítico de ajustar os níveis de tensão para garantir a eficiência e a segurança da transmissão. Ao transformar a energia gerada em tensões mais altas, essas subestações minimizam as perdas de energia que ocorrem ao longo das linhas de transmissão, especialmente em longas distâncias (Nóbrega, 2023).

2.2.1 Estrutura e Componentes das Subestações

O sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil é regulamentado por um conjunto de normas estabelecidas em Resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e no documento intitulado Procedimentos de Distribuição (PRODIST). Essas normas têm como objetivo orientar os participantes do sistema de distribuição, que incluem consumidores e produtores de energia, distribuidoras de energia, bem como agentes importadores e exportadores de energia (Sampaio, 2020).

Segundo Oliveira (2024), as regras disciplinam as formas, condições, responsabilidades e penalidades relacionadas à conexão, ao planejamento da expansão, à operação e à medição da energia elétrica. Além disso, estabelecem critérios e indicadores de qualidade. Esta seção não pode ser construída apenas com quadros ou tabelas, necessita de um texto escrito por você para contextualizar o que está sendo exposto.

De acordo com Tomaz (2023), o sistema de distribuição de energia elétrica faz parte do sistema elétrico que se encontra entre o sistema de transmissão e a entrada de energia dos consumidores. O diagrama simplificado de um sistema de distribuição, apresentado na Figura 1, ilustra a integração do sistema de distribuição com a Rede Básica, os níveis usuais de tensão de distribuição e os agentes envolvidos no setor de energia elétrica.

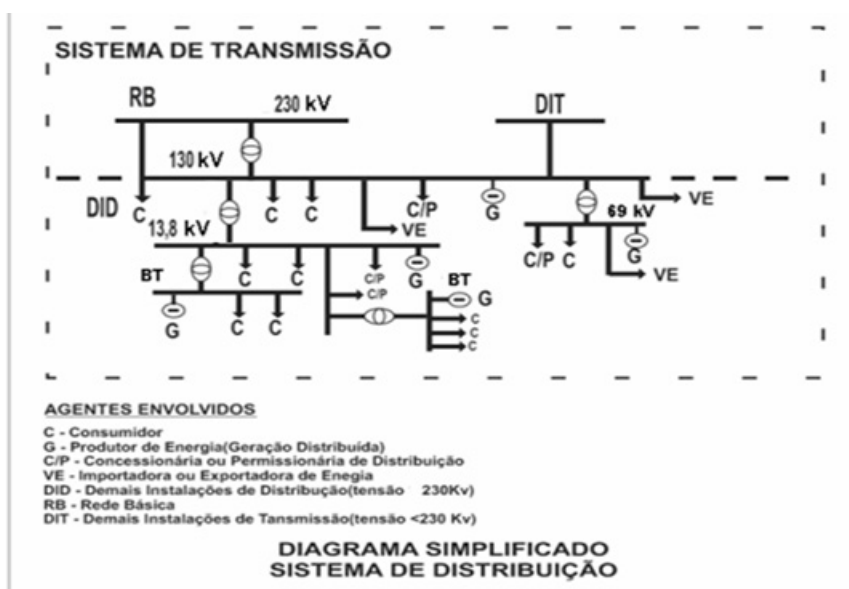


Figura 1. Sistema de distribuição e os agentes envolvidos.

Fonte: Tomaz (2023).

As tensões de conexão padronizadas para alta tensão (AT) e média tensão (MT) no sistema de distribuição são: 130 kV (AT), 69 kV (AT), 34,5 kV (MT) e 13,8 kV (MT). As tensões nominais padronizadas em baixa tensão. O sistema de distribuição pode ser subdividido em diversos componentes, conforme ilustrado na Figura 2, a seguir. Esses componentes incluem o sistema de subtransmissão, as subestações de distribuição e o sistema de dis-

tribuição primário, também conhecido como alimentadores de distribuição (Pereira Neto *et al.*, 2024).

O sistema de subtransmissão é uma parte do sistema de distribuição que se situa entre os sistemas de transmissão e as subestações de distribuição, operando geralmente com tensões entre 69 e 138 kV. As topologias utilizadas nesse sistema incluem a configuração radial, a radial com recurso, a em anel (loop) e a reticulada (grid ou network) (Medeiros Júnior, 2023).

Além disso, fazem parte do sistema os transformadores de distribuição, o sistema de distribuição secundário e os ramais de ligação. Cada um desses elementos desempenha um papel fundamental na distribuição eficiente de energia elétrica até os consumidores finais (Antunes, 2023).

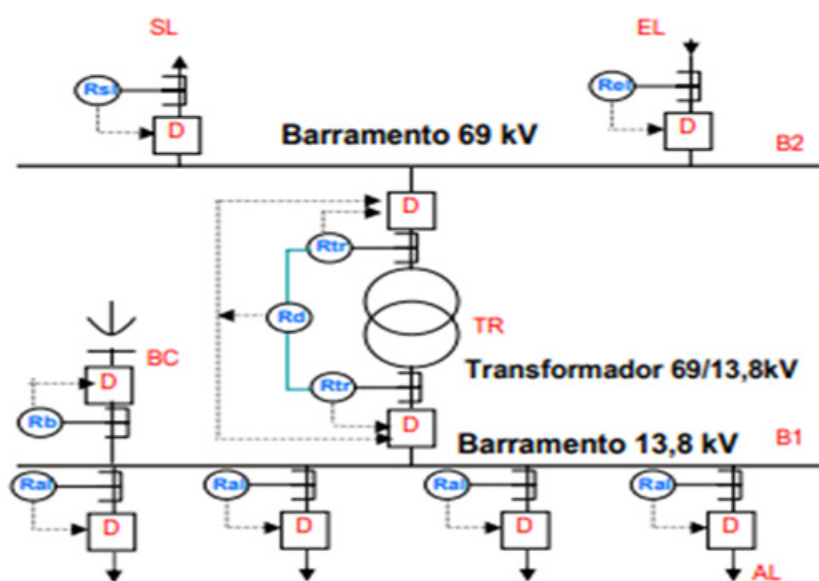


Figura 2. Diagrama Simplificado de uma Subestação Típica de Distribuição

Fonte: Silva (2016).

O termo “subestações” refere-se a um conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa equipamentos, condutores e acessórios destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas. As subestações (SE) funcionam como pontos de convergência, entrada e saída de linhas de transmissão ou distribuição, frequentemente atuando como uma interface entre dois subsistemas (Tomaz, 2023).

Segundo Silva (2016), as linhas que abastecem as subestações de distribuição da Coelce e consumidores da classe A-3 (classe de tensão de 72,5kV) têm sua origem nas subestações de 230/69kV. O subsistema elétrico suprido por cada uma dessas subestações define uma região elétrica de operação, também conhecida como ponto de entrega ou ponto de suprimento em 69kV.

2.2.2 Subestação de Energia Elétrica de Alta Tensão

Conforme Sampaio *et al.* (2020), uma subestação é composta por vários equipamentos essenciais para manobra, transformação, proteção e controle. Entre os principais equipamentos de pátio, destacam-se os transformadores de potência, para-raios, transformadores de corrente, transformadores de potencial, chaves seccionadoras e disjuntores.

Os transformadores de potência são os maiores e mais caros equipamentos presentes nas subestações, podendo pesar várias toneladas e ter um custo na ordem de milhões. Eles desempenham a função de elevar ou reduzir a tensão elétrica, facilitando a transmissão e o uso da energia em níveis de tensão diferentes dos originais (Costa *et al.*, 2023).



Figura 3. Banco de transformadores de potência 525/230kV

Fonte: Adaptado de Nóbrega (2023).

De acordo com a *Internacional Electrotechnical Commission* (IEC 60076), um transformador de potência é um equipamento estático com dois ou mais enrolamentos que converte um sistema de tensão e corrente alternadas em outro sistema, geralmente com tensão e corrente diferentes do sistema original, mantendo a frequência.

Segundo Henrique *et al.* (2023), os transformadores de corrente, também conhecidos como TCs, proporcionam isolamento em relação à alta tensão do circuito primário. Esses transformadores são classificados como transformadores de instrumentos e têm a função de enviar aos medidores, relés de proteção e dispositivos de controle, os valores de correntes proporcionais às que circulam pelos circuitos de potência.

De acordo com Oliveira (2024), os transformadores de potencial são utilizados para a medição de tensão em sistemas de alta tensão. Esse equipamento é essencial para permitir a obtenção dos valores de tensão no sistema, através de uma relação de transformação, de maneira similar ao que ocorre com os transformadores de corrente.

Os medidores, relés de proteção e outros dispositivos de controle são instalados no circuito secundário dos transformadores de instrumentos. O enrolamento primário do transformador de corrente é conectado em série com o circuito de alta tensão. A Figura 4, a seguir, apresenta um transformador de corrente de 525 kV (Silva, 2023).



Figura 4. Transformador de corrente 525kV.

Fonte: Adaptado de Nóbrega (2023).

Em termos funcionais, o transformador de potencial é um transformador para instrumentos, cujo enrolamento primário é conectado em derivação (em paralelo) a um circuito elétrico. O enrolamento secundário, por sua vez, é destinado a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos utilizados para medição, proteção ou controle.

A chave seccionadora tem a função de abrir e fechar circuitos no sistema de transmissão de energia elétrica, podendo ser comparada, para facilitar a compreensão, a um interruptor residencial que liga e desliga uma lâmpada. No entanto, a operação de abertura e fechamento de uma chave seccionadora só pode ser realizada quando o circuito já estiver sem carga (Antunes, 2023).

A Figura 5, a seguir, ilustra um transformador de potencial de 525 kV (Medeiro Junior, 2023).



Figura 5. 230kV Transformador de corrente 525kV.

Fonte: Adaptado de Nóbrega (2023).

De acordo com Costa et al. (2023), as chaves seccionadoras também são utilizadas em manobras que exigem o isolamento de um equipamento, como durante a manutenção de um disjuntor. Nessas situações, o circuito deve estar desligado e fisicamente aberto, com as chaves seccionadoras mantidas abertas e bloqueadas, garantindo que o circuito não seja energizado até a conclusão da atividade. A Figura 6, a seguir, ilustra uma chave seccionadora trifásica de 525 kV.



Figura 6. 230kV Chave seccionadora trifásica de 525kv.

Fonte: Adaptado de Nóbrega (2023).

As subestações de alta tensão desempenham um papel crucial no transporte de energia elétrica, pois permitem a transformação de níveis de tensão para otimizar a transmissão e distribuição de eletricidade. Ao elevar a tensão da energia gerada, as subestações reduzem as perdas resistivas ao longo das linhas de transmissão, permitindo que grandes quantidades de eletricidade sejam transportadas eficientemente por longas distâncias (Henrique *et al.*, 2023).

Além disso, a discussão sobre a relevância das subestações de alta tensão revela que essas instalações são essenciais para a integração de fontes de energia renovável na rede elétrica. Com a expansão de parques eólicos e solares, as subestações de alta tensão tornam-se pontos de conexão vitais, garantindo a compatibilidade entre diferentes fontes de geração e a rede de transmissão (Nóbrega, 2023).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo revelou que essas estruturas desempenham um papel crucial na conversão, controle e distribuição eficiente de eletricidade, garantindo a estabilidade do sistema e minimizando perdas. Além disso, as subestações se mostram essenciais para a integração de diferentes níveis de tensão, permitindo a continuidade do fornecimento de energia para consumidores em larga escala.

Durante o desenvolvimento do estudo, foi possível identificar a relevância das subestações elevadoras, abaixadoras e de distribuição, bem como os sistemas de proteção que garantem a qualidade da energia elétrica. A análise histórica da evolução do sistema elétrico no Brasil demonstrou que, embora progressos tenham sido feitos, ainda existem desafios a serem enfrentados, como a modernização das infraestruturas e a implementação de tecnologias mais eficientes e seguras.

A pesquisa também destacou a necessidade de um planejamento cuidadoso e investimentos em melhorias tecnológicas, visando não apenas a eficiência, mas também a sustentabilidade do sistema elétrico. O contexto atual exige que as subestações sejam adaptadas às novas demandas do setor energético, como a integração de fontes renováveis e a utilização de tecnologias de monitoramento e controle avançadas.

Em perspectiva, futuras pesquisas podem se concentrar em soluções inovadoras para otimizar o desempenho das subestações de alta tensão, incluindo o uso de inteligência artificial e sistemas de automação. Além disso, é essencial que estudos adicionais abordem a interconexão de subestações com as redes de distribuição, visando uma integração mais eficiente e sustentável do sistema elétrico como um todo. Esses avanços podem contribuir para um futuro energético mais robusto e confiável.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Ygor De Luca Medeiros et al. **Projeto Executivo de SPDA de uma Subestação Distribuidora de Energia Elétrica Após Unificação e Modernização**. 2023.
- COSTA, Alex Antonio et al. **Avaliação do índice de saúde de transformadores de potência: uma ferramenta de apoio à gestão de ativos**. 2023.
- GENNARI, Rodrigo. **Malha de aterramento de subestações**. 2017. Trabalho de Graduação de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá.
- HENRIQUE, Anthony et al. **Execução de testes em transformador de distribuição e estruturação do ensaio de relação de transformação para utilização no curso de graduação em engenharia elétrica**. 2023.

- MEDEIROS JÚNIOR, José Francismar de. **Estudo de curto-circuito para evitar a superação de equipamentos em subestações**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- NÓBREGA, Ivo Muhammad Duarte da. **Análise da manutenção e operação de subestações: subestação móvel 69/13,8 kV 25MVA**. 2023. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.
- NUNES, Mauro T. L. **Impacto da localização de geração distribuída nos dispositivos de proteção de um sistema elétrico**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) –Universidade Federal do Pampa. Baje.
- PEREIRA NETO, Jair de Oliveira et al. **Sistema multiusuário para treinamento em subestações de energia elétrica apoiado por técnicas de realidade virtual**. 2024.
- OLIVEIRA, André Fernandes et al. **Guia para elaboração de um plano de manutenção para subestações elétricas**. 2024.
- SAMPAIO, Rodrigo Duarte et al. **Subestações de energia elétrica: metodologia e dimensionamento para uma planta elétrica industrial**. 2020.
- SILVA, Alexandre Carvalho. **Uma solução de integração de sistemas de realidade virtual e tradicionais de operação de subestações de energia elétrica**. 2020. 97 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.16>
- SILVA, David M. K. **Fluxo de potência para sistemas de distribuição considerando redução de barras**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina.
- SILVA, Rafael Schincariol. **Sistemas elétricos de potência I**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.
- VENDRAMETO, Helen Vellozo. **Avaliação do ciclo de vida de transformadores de potência considerando aspectos técnicos, regulatórios e econômicos**. 2023.
- VASCONCELOS, Filipe Matos de. Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. **Londrina: Editora e Distribuidora Educacional SA**, 2017.
- TOMAZ, Eduardo Pereira. **Estudo de adequação normativa de subestações de média tensão de uma indústria têxtil do Ceará**. 2023. 110 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

Resumo

O presente artigo trata da importância da proteção nos sistemas elétricos de potência, abordando os principais desafios enfrentados para garantir a segurança e a continuidade do fornecimento de energia. O problema central está relacionado às falhas que podem ocorrer nesses sistemas, como curtos-circuitos e sobrecargas, e às consequências graves que podem resultar em danos aos equipamentos, interrupção no fornecimento de energia e riscos à segurança das pessoas. O objetivo do estudo é analisar as tecnologias e práticas de proteção aplicadas aos sistemas de potência, com foco em como essas medidas podem minimizar os impactos de falhas elétricas. A metodologia utilizada consiste em uma revisão de literatura abrangente, envolvendo a análise de normas técnicas, como as da IEEE e IEC, além de estudos de caso sobre o uso de dispositivos de proteção, como relés e disjuntores. A pesquisa busca comparar diferentes tecnologias de proteção, destacando as mais eficientes na mitigação de falhas. Também são abordadas as implicações econômicas e a necessidade de modernização constante dos sistemas de proteção. Como principais considerações, o artigo conclui que a proteção adequada é essencial para garantir a confiabilidade do sistema elétrico de potência. A implementação de tecnologias modernas, como relés digitais, aumenta a eficiência da resposta a falhas, contribuindo para a redução de custos operacionais e a segurança do sistema. O estudo ressalta a importância da atualização contínua dos sistemas de proteção, acompanhando o avanço das inovações tecnológicas.

Palavras-chave: Sistemas de Potência. Transmissão. Curto-circuito.

Abstract

This article addresses the importance of protection in electrical power systems, addressing the main challenges faced to ensure the safety and continuity of energy supply. The central problem is related to the failures that can occur in these systems, such as short circuits and overloads, and the serious consequences that can result in damage to equipment, interruption in the power supply and risks to people's safety. The objective of the study is to analyze protection technologies and practices applied to power systems, focusing on how these measures can minimize the impacts of electrical failures. The methodology used consists of a comprehensive literature review, involving the analysis of technical standards, such as those from IEEE and IEC, as well as case studies on the use of protection devices, such as relays and circuit breakers. The research seeks to compare different protection technologies, highlighting the most efficient in mitigating failures. The economic implications and the need for constant modernization of protection systems are also addressed. As main considerations, the article concludes that adequate protection is essential to guarantee the reliability of the electrical power system. The implementation of modern technologies, such as digital relays, increases the efficiency of fault response, contributing to the reduction of operational costs and system safety. The study highlights the importance of continually updating protection systems, following the advancement of technological innovations.

Keywords: Power Systems. Transmission. Short circuit.



1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência desempenha um papel fundamental na infraestrutura global, fornecendo energia elétrica confiável para atender às necessidades crescentes de uma sociedade em constante evolução. A crescente complexidade e interconexão desse sistema representam desafios significativos em termos de estabilidade, confiabilidade e segurança (Silva, 2020).

A proteção do sistema elétrico de potência surge como uma área crítica de pesquisa e desenvolvimento, pois desempenha um papel crucial na prevenção de falhas catastróficas, minimizando interrupções no fornecimento de energia e garantindo a segurança de pessoas e ativos (Nunes, 2014).

A interrupção no fornecimento de energia elétrica tornou-se cada vez menos tolerável, uma vez que essa energia é fundamental para atividades relacionadas ao lazer, bem-estar e desenvolvimento econômico. Uma falha generalizada no sistema elétrico pode ser extremamente dispendiosa e afetar milhões de consumidores, gerando impactos econômicos e sociais significativos (Neri, 2015).

As falhas mais comuns em um SEP incluem curtos-circuitos, sobrecargas, flutuações de tensão e corrente, muitas vezes resultantes de fenômenos naturais, falhas em materiais e equipamentos, e erros humanos. Na maioria das vezes, as interrupções têm origem em componentes como linhas de transmissão, redes de distribuição, barramentos de subestações, transformadores de potência e geradores. Portanto, é de vital importância que um sistema de proteção seja projetado e dimensionado de maneira adequada (Gomes, 2023).

A utilização da energia elétrica reside na necessidade premente de compreender e abordar os desafios associados à proteção do sistema elétrico de potência. Dada a crescente demanda por energia elétrica e a complexidade das redes interconectadas, é essencial aprofundar nosso conhecimento sobre como proteger eficazmente esse sistema. Isso se torna ainda mais crucial devido aos impactos significativos que interrupções no fornecimento de energia têm sobre a sociedade e a economia.

A demanda por energia elétrica vem se elevando de forma expressiva nas últimas décadas. A crescente rede de interconexões entre sistemas elétricos preexistentes trouxe consigo a necessidade de um controle mais complexo e significativo. A operação dos sistemas elétricos de potência está sujeita a falhas em seus componentes, o que resulta em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores. Diante desse cenário, surge uma indagação fundamental: Quais são as contribuições que os componentes de proteção oferecem ao sistema elétrico de potência?

O objetivo geral deste artigo é estudar a importância da proteção do sistema elétrico de potência para assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos usuários, garantindo a confiabilidade e a segurança do fornecimento. Para atingir esse objetivo, serão abordados os seguintes objetivos específicos: apresentar conceitos básicos sobre o sistema elétrico de potência, caracterizar os tipos de componentes que compõem o sistema de proteção e discorrer sobre a relevância da proteção em linhas de transmissão, evidenciando sua importância para a integridade do sistema como um todo.

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilita a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico,

Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Na pesquisa foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzam a obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para busca compreendeu os últimos 10 anos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Resultados e Discussão

No Brasil a energia elétrica desempenha um papel fundamental na vida das pessoas. no contexto do cotidiano e das atividades realizadas pela sociedade moderna, a disponibilidade e a confiabilidade desse recurso são de extrema importância. quando a energia elétrica não está disponível, as consequências podem ser significativas, afetando não apenas a economia local, mas também todo o país (Silva, 2020).

De acordo com Silva (2020) crucial compreender que a garantia de um fornecimento contínuo e ininterrupto de energia elétrica depende da operação e manutenção adequadas do Sistema Elétrico de Potência (SEP). O SEP é o conjunto de equipamentos que opera de maneira coordenada, abrangendo desde a geração de energia elétrica até o seu consumo, incluindo os sistemas de transmissão e distribuição. Conforme figura 1 a seguir:



Figura 1. Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Fonte: Adaptado Silva (2020).

Portanto, é fundamental realizar análises adequadas e precisas dos sistemas elétricos de potência de forma constante, em diversas condições de operação, bem como durante situações de distúrbios, a fim de garantir a segurança de todo o sistema (Silva, 2020).

A produção de energia elétrica envolve uma variedade de fontes de energia, muitas das quais não estão localizadas próximas aos principais centros de consumo. Como resultado, a eletricidade gerada precisa ser transportada por meio de extensas linhas de transmissão, que normalmente são dimensionadas para operar de maneira econômica com

altas tensões e em corrente contínua, devido à longa distância percorrida (Gomes, 2023).

Além das linhas de transmissão, como destaca Frazão (2019), o sistema de transmissão de energia elétrica requer a presença de várias instalações, incluindo subestações de elevação, subestações de rebaixamento, retificadores, inversores e interligações. Cada uma dessas instalações deve possuir seus próprios barramentos e equipamentos específicos. Portanto, o sistema elétrico de potência é composto por um conjunto complexo de componentes, juntamente com as usinas geradoras de energia.

Conforme Souza e Guimaraes (2020), as linhas de transmissão desempenham um papel crucial ao conectar as centrais geradoras às redes de distribuição, possibilitando a interconexão com outros sistemas de potência. A transmissão de energia elétrica, em essência, consiste no transporte do fluxo de energia de uma região para outra.

Conforme Nunes (2014), a utilização de linhas de transmissão em corrente contínua é reservada para aplicações específicas, como a interligação de sistemas com frequências distintas ou para a transmissão de energia em longas distâncias. Isso ocorre devido ao custo cada vez mais elevado das estações conversoras necessárias para converter a corrente alternada em corrente contínua e vice-versa.

De acordo com Menezes (2023), os sistemas de proteção são definidos como os responsáveis por gerenciar todos os equipamentos utilizados para detectar, localizar e eliminar a ocorrência de um curto-circuito ou falha de operação em um sistema elétrico.

Sua função principal é minimizar os danos aos equipamentos defeituosos, reduzir o tempo de inatividade do sistema e diminuir os custos com manutenções corretivas. Em síntese, o objetivo da proteção é garantir a qualidade do serviço de forma econômica, assegurando uma vida útil adequada às instalações (Gomes, 2023).

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são grandes redes de energia que englobam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Esses sistemas possuem maquinário de grande porte e de operação complexa, o que demanda técnicas e estudos especializados de alto nível para sua correta projeção, instalação, manutenção e operação (Neri, 2015). Conforme Francisco *et al.* (2023), os sistemas elétricos de potência estão sujeitos a uma ampla variedade de distúrbios, que vão desde cargas lentas e contínuas até eventos súbitos como curto-circuitos, falhas inesperadas de geradores e manobras operacionais.

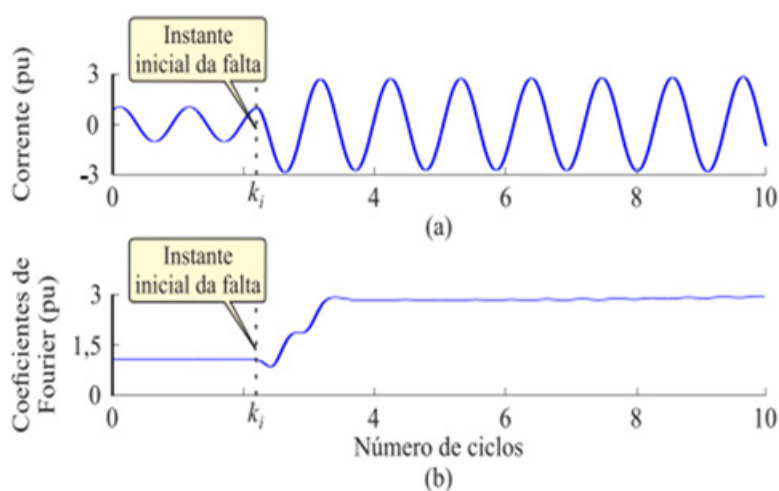


Figura 2. Sinal de sobrecorrente de falha

Fonte: Adaptado Nunes (2014).

Durante a operação dos sistemas elétricos de potência, é comum ocorrerem falhas

em seus componentes, resultando em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores conectados, o que prejudica a qualidade do serviço (Silva, 2020). O curto-circuito é a falha mais frequente, causando correntes elevadas em todos os elementos energizados e distúrbios graves de tensão em todo o sistema elétrico, às vezes causando danos irreparáveis.

A proteção contra sobrecorrente em sistemas elétricos de potência é fundamental para garantir a segurança e a integridade dos equipamentos e da rede elétrica. Sobrecorrente ocorre quando o fluxo de corrente em um circuito excede os níveis projetados, o que pode ser causado por curtos-circuitos, falhas de aterramento ou sobrecargas (Silva Júnior, 2023). De acordo com Piotrowski *et al.* (2023), dispositivos como disjuntores e fusíveis são amplamente utilizados para prevenir danos causados por sobrecorrentes. Eles atuam como mecanismos de proteção ao interromper o circuito quando a corrente atinge níveis perigosos.

Conforme Nunes (2014), além de proteger os equipamentos, a proteção contra sobrecorrente também desempenha um papel importante na preservação da estabilidade do sistema elétrico. Em sistemas de potência, a interrupção rápida e eficiente de correntes excessivas evita a propagação de falhas que poderiam comprometer grandes partes da rede. A correta coordenação dos dispositivos de proteção é essencial para garantir que apenas as áreas diretamente impactadas sejam isoladas, evitando quedas generalizadas no fornecimento de energia.

2.2.1 Proteção de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão têm como função principal transportar a energia elétrica gerada nas usinas até as subestações rebaixadoras, localizadas próximas aos centros de consumo. No Brasil, como a maior parte da energia provém de usinas hidrelétricas, que geralmente estão distantes dos centros de carga, são necessárias longas linhas de transmissão (Vasconcelos, 2023).

De acordo com Souza e Guimaraes (2020), para garantir a segurança das linhas de transmissão, além dos relés, são usados outros dispositivos de proteção. Entre eles estão os cabos para-raios, que são instalados na parte superior das torres para proteger contra sobretensões causadas por descargas atmosféricas e surtos de manobras, e disjuntores que funcionam em conjunto com os relés de proteção.

Segundo Menezes (2023), dados estatísticos indicam que cerca de 60% das falhas em sistemas elétricos de potência ocorrem nas linhas de transmissão, principalmente devido a curtos-circuitos e sobrecargas. Por isso, a proteção dessas linhas deve ser rápida e seletiva, atuando apenas na área onde a falha ocorre, para evitar a interrupção generalizada do sistema e reduzir os danos aos equipamentos.

As torres são elementos fundamentais e os mais visíveis em um sistema de transmissão de energia elétrica. Sua principal função é sustentar o circuito elétrico, mantendo os condutores a uma distância segura entre si e do solo. Essas estruturas desempenham um papel essencial para garantir a eficiência e a segurança da transmissão de energia, minimizando riscos de curtos-circuitos e outras falhas devido à proximidade entre os cabos condutores (Miranda; Richard, 2014).

De acordo com Silva (2020), as torres de transmissão variam em tipos e materiais. Geralmente, são feitas de aço galvanizado para garantir resistência e durabilidade, especialmente em ambientes expostos a condições climáticas adversas. Elas podem ser classi-

ficadas como autoportantes, que se mantêm estáveis pela própria estrutura, ou estaiadas, que são reforçadas por cabos de aço fixados no solo para garantir maior estabilidade em terrenos desafiadores ou ventos fortes.

De acordo com Frazão (2019), os cabos de guarda são instalados no topo das torres de transmissão, posicionados acima dos condutores, e têm como principal função proporcionar a proteção dos condutores contra descargas atmosféricas. Esses cabos, normalmente fabricados em aço revestido de alumínio, podem, em algumas situações, conter em seu núcleo um conjunto de fibras ópticas.

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de perturbações nas redes de transmissão, gerando surtos de tensão que podem alcançar centenas de quilovolts. Esses surtos têm o potencial de causar danos materiais às estruturas afetadas e representam um risco à vida de pessoas e animais próximos (Campos; Estevam, 2020)

Conforme Menezes (2023), demonstrado na Figura 3, na ausência de cabos de guarda, a corrente das descargas atmosféricas teria apenas dois caminhos para escoar. No entanto, com a presença desses cabos, há mais vias disponíveis para o escoamento da corrente, contribuindo para uma distribuição mais segura e eficiente da descarga elétrica.

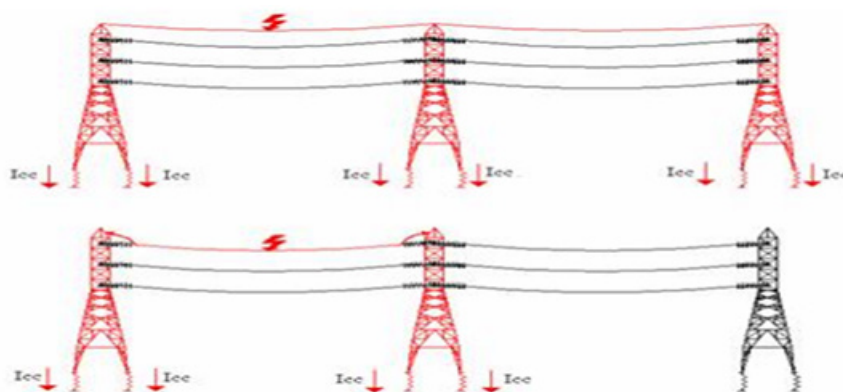


Figura 3. Instalação com cabo de guarda e sem cabo de guarda

Fonte: Adaptado Nunes (2014).

O sistema de aterramento é essencial em qualquer instalação elétrica, sendo composto por hastes ou cabos que são intencionalmente conectados ao solo. Esses elementos, geralmente fabricados em aço galvanizado ou aço revestido de cobre, têm a função de proporcionar um caminho seguro para a dissipação de correntes anormais que possam ocorrer nas linhas de transmissão (Nunes, 2014).

De acordo Silva Júnior (2022), existem dois métodos comuns de aterramento, sendo um deles o uso de eletrodos instalados de forma perpendicular à superfície do solo, conhecidos como hastes de aterramento ou eletrodos verticais. Esses eletrodos, geralmente cravados na vertical, garantem uma conexão eficiente com o solo, como ilustrado na figura 4.



Figura 4. Eletrodo vertical

Fonte: Adaptado Silva Júnior (2022).

A escolha do solo como meio de escoamento se deve ao fato de que ele apresenta potencial nulo, ou seja, ausência de tensão, o que torna o solo um meio eficaz com baixa resistência para a passagem dessas correntes. De acordo com Francisco *et al.* (2023), o desenvolvimento de um projeto de aterramento de linhas de transmissão exige um conhecimento detalhado da resistividade do solo. O condutor aterrado deve ser capaz de suportar, por um período de tempo, tanto as correntes geradas por descargas atmosféricas quanto as correntes de curto-circuito previstas para a linha de transmissão. A adequada implementação desse sistema contribui significativamente para a segurança e confiabilidade da rede elétrica, minimizando riscos de falhas e danos.

Segundo Miranda e Reichard (2014), esse tipo de proteção utiliza relés de sobrecorrente, designados pelas funções [50/51], que podem ser aplicados a qualquer elemento do sistema, respondendo conforme a amplitude da corrente. Embora comum em diversas tensões, a proteção de sobrecorrente pode atuar sozinha em sistemas radiais de distribuição ou ser combinada com proteções de maior complexidade, como a proteção de distância e a proteção diferencial.

A proteção direcional de sobrecorrente é necessária quando o fluxo de corrente em uma linha de transmissão ocorre em mais de um sentido, situação comum em sistemas onde duas ou mais subestações são conectadas, cada uma com suas próprias fontes de geração. Conforme Silva Júnior (2022), os relés direcionais de sobrecorrente são fundamentais para garantir a seletividade e a coordenação do sistema nesses casos, assegurando que a proteção seja ativada corretamente conforme o sentido do fluxo de corrente.

A proteção de distância, por sua vez, é amplamente utilizada em redes de alta e muito alta tensão. Segundo Frazão (2019), esse tipo de proteção se diferencia pela sua capacidade de operar com base na impedância do circuito, sendo temporizada e escalonada conforme essa variável. Para aumentar a confiabilidade do sistema, são adotados esquemas de teleproteção, que permitem o desligamento rápido em caso de falhas. Além disso, essa proteção oferece independência em relação à necessidade de fios pilotos, permitindo maior flexibilidade e eficiência.

Dentro da proteção de distância, existem diferentes tipos de relés, como os de reatância, admitância e impedância, cada um adequado a situações específicas. Conforme Piotrowski *et al.* (2021), os relés de reatância são recomendados para linhas curtas, os de admitância para linhas longas, e os de impedância para linhas de comprimento médio. Cada um desses relés é projetado para lidar com as particularidades das redes de transmissão, garantindo a proteção adequada mesmo em condições de resistência de arco elevada ou oscilações indesejáveis de potência.

O curto-circuito é uma condição de extrema relevância tanto no planejamento quanto na operação de sistemas elétricos de potência. A análise desse fenômeno permite que se tomem decisões críticas no que diz respeito à escolha e ajuste de dispositivos de proteção. O curto-circuito pode ser definido como a passagem excessiva de corrente em um circuito (Gomes, 2023).

Tal análise é essencial no estudo de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), especialmente no momento de definir e dimensionar os equipamentos de proteção. O cálculo de curto-circuito, em conjunto com o da corrente nominal, garante que os dispositivos estarão aptos a interromper adequadamente as correntes de falha, ajustando-se às elevações de corrente previstas (Matos, 2015).

A simulação numérica de curto-circuito em pontos específicos do sistema tem um papel crucial no planejamento e execução das instalações do SEP. Ela possibilita antecipar falhas e realizar ações preventivas, minimizando perturbações no sistema e garantindo que os equipamentos resistam às correntes de falta (Oliveira, 2022).

Um circuito simples $R+jX$ exibe uma corrente de curto-circuito composta por duas partes: uma componente em corrente alternada e outra em corrente contínua, ambas decrescentes ao longo do tempo. A soma dessas componentes forma a corrente total de curto-circuito. Próximo a geradores, a reatância diminui com o tempo, reduzindo a componente alternada. Já em locais distantes, essa componente permanece constante, enquanto a corrente contínua surge pela inércia da corrente nas indutâncias do sistema (Matos, 2015, p. 20).

Segundo Oliveira (2022), a corrente de curto-circuito, conforme ilustrado em gráficos, possui diferentes componentes ao longo do tempo: a subtransitória, a transitória, a de regime permanente e a em corrente contínua. Esses componentes ajudam a identificar o comportamento da corrente em um sistema durante um curto-circuito. O fenômeno ocorre quando há uma elevação significativa da corrente elétrica além do previsto no dimensionamento do circuito, resultando em uma sobrecarga no sistema elétrico.

Compreender o comportamento da corrente de curto-circuito é fundamental para a proteção do sistema elétrico. A análise detalhada permite prever os possíveis impactos e garantir que os equipamentos estejam devidamente dimensionados para suportar as falhas. A antecipação das falhas e a correta escolha dos dispositivos de proteção são essenciais para manter a segurança e o desempenho do sistema elétrico, evitando danos permanentes e interrupções indesejadas (Silva, 2020).

De acordo com Nunes (2014), os curtos-circuitos representam as maiores oscilações de corrente que podem ocorrer em um sistema elétrico. Se não forem devidamente limitados em magnitude e tempo de duração, podem causar sérios danos às peças e equipamentos pelos quais a corrente passa.

Dessa forma, os dispositivos de proteção precisam ser extremamente rápidos em sua resposta, garantindo que o curto-circuito seja interrompido dentro desse limite de tempo seguro. Além disso, os equipamentos de manobra utilizados no sistema elétrico devem ser capazes de operar sob condições de corrente máxima, assegurando que o sistema continue funcionando de forma confiável e segura mesmo durante situações de falha (Souza; Guimarães, 2020).

De acordo com Francisco *et al.* (2023), a utilização de relés de proteção é frequentemente vista como uma tarefa complexa e repleta de escolhas a serem arbitradas. Isso ocorre porque envolve conciliar diferentes objetivos, muitas vezes conflitantes, ao garantir

que o sistema elétrico de potência (SEP) opere de maneira adequada em diferentes cenários.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conclusão do artigo reafirma a relevância da proteção em sistemas elétricos de potência, destacando que os objetivos propostos foram amplamente alcançados. O estudo conseguiu demonstrar que a adoção de tecnologias avançadas, como relés digitais e disjuntores inteligentes, contribui significativamente para a mitigação de falhas, assegurando a continuidade do fornecimento de energia e a segurança dos equipamentos e pessoas.

No entanto, algumas limitações foram observadas durante a pesquisa. A principal delas foi a falta de dados empíricos mais atualizados sobre a aplicação prática das novas tecnologias em diferentes cenários de operação. Isso restringiu uma análise mais detalhada sobre a eficiência de cada solução em contextos específicos, como áreas urbanas e rurais, onde as condições de operação podem variar significativamente.

Além disso, o estudo levanta algumas recomendações importantes. A primeira é a necessidade de uma modernização constante dos sistemas de proteção, visto que a tecnologia está em constante evolução e o SEP precisa acompanhar essas inovações para garantir a confiabilidade. A segunda recomendação é o desenvolvimento de políticas de manutenção preventiva mais robustas, que poderiam prevenir falhas antes que estas causem danos significativos.

Por fim, o artigo sugere trabalhos futuros focados na análise prática de diferentes tecnologias de proteção em cenários específicos, além de estudos sobre o custo-benefício da implementação de sistemas mais avançados em larga escala, considerando as características regionais e o perfil de consumo.

Ao submeter o trabalho, os autores tornam-se responsáveis por todo o conteúdo da obra.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, Luís F. G. D.; ESTEVAM, Giuliano P. A atuação das subestações no Sistema Elétrico. **Revista eSA-LENG – Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO**, 2020.
- FRANCISCO, Vinicius Augusto de et al. **Sistema elétrico de potência (S.E.P): controle e qualidade da energia**, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso - Etec Paulino Botelho, São Carlos, 2023.
- FRAZÃO, R. **Proteção do sistema elétrico de potência**. Londrina: Educacional, 2019.
- GOMES, Augusto Felix. Internet of energy: “**uma gestão inteligente, eficiente e sustentável do sistema elétrico de potência via internet**”. 2023. 68f. Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção-Ceará, 2023.
- MENEZES, João Augusto Beladona. **Metodologia de estimação de dados de temperatura ambiente para aplicações no sistema elétrico de potência**. 2023.
- MIRANDA, L; REICHARD, M. **Aplicação de Sistema de Proteção – Geradores Eólicos**. IX Seminário Técnico de Proteção e Controle, Belo Horizonte, 2014.
- NUNES, E. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. UNIFACS, Universidade Salvador. Salvador, 2014.
- OLIVEIRA, Néviton César Silva et al. **Projeto de subestação para conexão de usina de minigeração distribuída em sistema de média tensão**. 2022.



PIOTROWSKI, Leonardo Jonas et al. Análise das perdas de energia no sistema elétrico de distribuição brasileiro. **SEPOC 2021**, 2021.

SILVA, André Costa. **Sistemas elétricos de potência e proteção de linhas de transmissão**. 2020. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

SILVA JÚNIOR, Rogenilton Vieira Gomes da. **Análise da aplicabilidade de chaves sincronizadoras em manobras associadas a transformadores no sistema elétrico de potência**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SOUZA, Maurício Pereira Gonzaga de; GUIMARÃES, Lucas Bernardino Teixeira. **Proteção do sistema elétrico de potência: análise de caso**. 2020.

VASCONCELOS, Kijartan Alencar Barros de. **Estudos de proteção digital para sistemas elétricos de potência sob diversas condições de faltas em bancada didática smart grid**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.



SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: INTEGRAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: INTEGRATION INTO SMART GRIDS

Daniel Thales Sousa Ferreira

22

Resumo

Essa pesquisa tem por objetivo exemplificar a integração das redes inteligentes *Smart Grid* com sistemas de geração de energia fotovoltaica. Com a busca incessante por fontes de energias renováveis no cenário mundial, a energia solar vem se destacando com larga escala de crescimento, entretanto, faz-se necessário a integração sistemática de recursos que possibilitam melhoria na utilização da energia elétrica fotovoltaica. Esses recursos são agregados ao sistema de geração, transmissão e consumo da energia elétrica, formando assim uma rede inteligente, que é conhecida por *Smart Grid*. É necessário destacar a importância desses recursos, pois sem a integração deles não seria possível a geração e consumo eficiente da energia elétrica.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica. Energia Renovável. Automação. Meio Ambiente.

Abstract

This research aims to exemplify the integration of Smart Grids with photovoltaic power generation systems. With the incessant search for renewable energy sources on the world stage, solar energy has been standing out with large-scale growth. However, it is necessary to systematically integrate resources that enable improvement in the use of photovoltaic electrical energy. These resources are aggregated to the system of generation, transmission and consumption of electrical energy, thus forming an intelligent network, which is known as Smart Grid. It is necessary to emphasize the importance of these resources, because without their integration, efficient generation and consumption of electrical energy would not be possible.

Keywords: Photovoltaic Energy. Renewable Energy. Automation. Environment.

1. INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica proporciona vastas áreas de estudo por suas riquezas em recursos que compõe e formam todo o seu sistema. Quem diria que, um dia fosse possível transformar a luz solar em energia elétrica que por sua vez gera energia mecânica. Portanto, para que haja a conversão da luz solar para a energia elétrica é necessário a utilização e integração de equipamentos que auxiliam e formam uma rede inteligente de monitoramento do sistema elétrico, também conhecidas como *Smart Grid*.

A integração de uma rede inteligente proporciona uma tecnologia de comunicação avançada com todo sistema elétrico, podendo haver uma interação prática através de aplicativos de controle de dados de consumo e geração, atribuindo melhorias significativas na comunicação com o usuário e até mesmo com a concessionária de energia elétrica.

Observando um sistema de energia elétrica fotovoltaico, existem alguns fatores importante para que haja um perfeito funcionamento, um deles é o monitoramento de informações, sem controle de informações, pode existir falha em sua demanda tanto na quantidade gerada de energia quanto no consumo excessivo da carga, por isso, é crucial adotar um sistema de medição e informações para que ocorra o pleno funcionamento da rede.

Diante do desenvolvimento e transição energética fotovoltaica no país, a busca por novos métodos e tecnologias relacionados a geração, distribuição e consumo inteligente da energia elétrica tem sido estudado para atender a necessidade da demanda elétrica, portanto, qual a importância da integração da *Smart Grid* em um sistema fotovoltaico?

A *Smart Grid* incorpora tecnologia digital para facilitar a checagem de informações e oferece um intercâmbio bidimensional nas redes elétricas, ou seja, a rede inteligente que está interligada em todo sistema elétrico de forma panorâmica demonstra através de valores, dados, métricas, o consumo real geração de energia e até mesmo o armazenamento da energia gerada através da energia solar.

A energia fotovoltaica é uma energia limpa e renovável, tem por base a utilização da energia solar, uma fonte de energia ilimitada, por isso, é de extrema relevância para o mundo. Com o crescimento populacional mundial, a poluição ambiental também aumenta, por esse motivo gera uma busca de alternativas que não desenvolvam impactos ambientais para o mundo, a energia fotovoltaica agrega tanto no valor de suprir nossas necessidades de energia elétrica no dia a dia, quanto na necessidade da diminuição de impactos ambientais como, gases e processos que geram degradação ambiental (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Por meio dessa pesquisa entende-se que ela irá somar na compreensão para um tema tão popular e importante que é energia solar, entretanto, a pesquisa está disposta e vinculada na integração de redes inteligentes, *Smart Grid*. O processo de integração de checagem avançada em um sistema elétrico impacta em diferentes fatores, que será possível instigar ao proceder da pesquisa.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A construção da pesquisa será realizada e baseada através de revisão de literatura, com o objetivo de demonstrar a respeito da energia fotovoltaica e integração de redes in-



teligentes, o conteúdo apresentará a desmistificação do tema pressuposto para compreensão a fins de estudos e contribuição ao leitor. A revisão será dotada de conteúdos que compõem todo sistema, as palavras chaves utilizadas na busca serão: a importância da energia solar fotovoltaica, análise sobre integração de redes inteligentes em sistemas fotovoltaicos, seus benefícios e desafios, melhorias e aprimoramento das redes inteligentes.

A metodologia proporcionará ao leitor o entendimento por meio de artigos científicos, argumentações de livros sobre energia solar fotovoltaica, sites de banco de dados como google acadêmico e *scielo*, sites com conceitos baseando em estudos científicos. A pesquisa será dotada de bases e dados que contenham informações dos últimos 10 anos, ou seja, de 2014 até 2024, sendo assim, será uma revisão biográfica rica em dados da atualidade e desenvolvida para a total compreensão do leitor.

2.2 Resultados e Discussão

O crescimento exponencial na demanda por fontes de energias renováveis e um gerenciamento eficaz têm sido o motivo de pesquisas para o desenvolvimento de métodos e tecnologias que possibilitam a inovação para a geração e distribuição da energia elétrica. Em meio a essa metodologia, a energia fotovoltaica tem se destacado como uma fonte de energia renovável mais relevante devido sua abundância de sua matéria-prima geradora de energia e a sustentabilidade que proporciona.

Segundo pesquisas de Machado, Miranda (2015) o jornal *The New York Time* realizou uma publicação que dizia que o sol fornece a energia necessária à terra para a produção de energia elétrica para alimentar toda a demanda mundial diversas vezes. “A superfície terrestre recebe cerca de 3×10^{24} joules por ano, $9,5 \times 10^4$ TW (Terawatt), cerca de 10.000 vezes a mais de energia que toda população consome”.

A instalação de fontes renováveis tem se tornado uma prioridade para vários países do mundo, impulsionada pelas metas globais da organização das nações unidas (ONU), buscando a redução de emissões de gás carbono e aumento de fontes de energia elétrica renovável.

Capacidade global de geração renovável (GW)

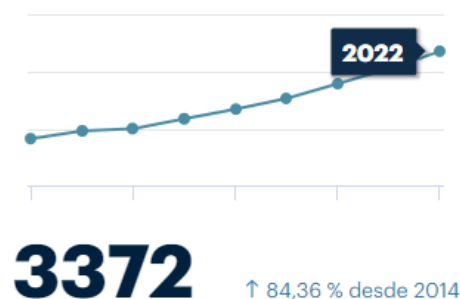


Figura 1. Escala global de geração de energia renovável IRENA de 2014 até 2022

Fonte: IRENA (2022)

De acordo com a agência internacional de energia renovável (IRENA), a capacidade instalada mundial de energia renovável até (2022) atingiu um pouco mais de 3,300 GW

como mostra na Figura 1, refletindo um grande crescimento ao longo dos anos. Essa implementação de crescimento em energia renováveis relaciona no destaque da conscientização da necessidade de sustentabilidade e incentivos econômicos.

A geração e distribuição da energia elétrica fotovoltaica implica positivamente para o planeta pois em sua geração poupa a liberação de gás carbônico, um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, na 21ª Conferência de Partes (COP21) em Paris, foi acordado o objetivo de reduzir ameaças da mudança de clima mundial. O Brasil se comprometeu em reduzir emissões de gases de efeito estufa em até 43% até 2030.

Uma das medidas adotadas para a redução dos gases de efeito estufa é a instalação de mais energias renováveis, como a energia solar. Analisando os benefícios da energia fotovoltaica, atribui uma economia inestimável tendo em vista que a energia solar é uma fonte inesgotável, além de contribuir de forma sustentável ao meio ambiente, já que é uma das fontes de energia que não utilizam combustíveis fósseis, a energia solar possibilita a diminuição da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera como mencionado.

A energia fotovoltaica é relevante tanto para residências quanto para indústrias. Em residências a energia fotovoltaica possibilita a geração limpa e reduz a dependência das concessionárias de energia elétrica, oferece uma autonomia e uma economia de energia significativa. Em indústrias e em meios comerciais a energia fotovoltaica promove sustentabilidade ambiental e contribui para a redução de custos com energia elétrica.

A produção da energia fotovoltaica compõe seu princípio de funcionamento através de módulos solares que geram energia elétrica a partir da radiação solar. Esses módulos solares são fabricados em silício, um material semicondutor que por sua vez é composto por outros materiais que ajudam na divisão e distribuição das conexões positivas e negativas.

Para criar uma diferença de potencial de positivo e negativo, o silício é misturado com o fósforo e boro, na composição do silício com o fósforo fluem elétrons (carregados positivamente), formando a conexão “P”, na composição do silício com o boro fluem elétrons (carregados negativamente) formando a conexão “N”, (MACHADO *et al.*, 2015)

Como podemos notar na figura 2, existe a diferença de potencial negativo e positivo entre as cargas, o que resulta na produção de tensão contínua CC, que por sua vez é transformada em tensão alternada AC através de outros equipamentos que compõem a rede elétrica. Os outros equipamentos instalados ao sistema formam uma rede, que por sua vez pode ser gerenciável, conhecidas por redes inteligentes.

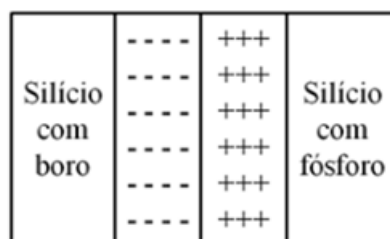


Figura 2. Ilustração da separação das cargas nas juntas P-N.

Fonte: Energia Solar fotovoltaica: Uma breve revisão

A energia fotovoltaica envolve outros componentes físicos além de placas de silício. Os

hardwares são um conjunto de componentes físicos como sensores, medidores, *nobreak*, transformadores entre outros dispositivos. Os dispositivos físicos fornecem sinais e informações para centrais de controle *Softwares* responsáveis pelo gerenciamento de dados. Esses dispositivos possuem o papel de atuar, registrar, monitorar, armazenar, automatizar dados e gerenciar a produção de energia de maneira mais eficiente, confiável e segura.

A integração de uma rede inteligente chamada de *Smart Grid*, termo que vem da língua inglesa, apresenta uma melhoria significativa no setor da energia elétrica, possibilitando uma maior eficiência no consumo e distribuição, maior flexibilidade e confiabilidade no monitoramento.

Quando existe a integração de um sistema de monitoramento inteligente, é possível mensurar dados quantitativos e qualitativos de toda rede elétrica, ou seja, existe a interação do usuário e produtor, esse processo afeta positivamente em melhorias de geração e distribuição de energia elétrica.

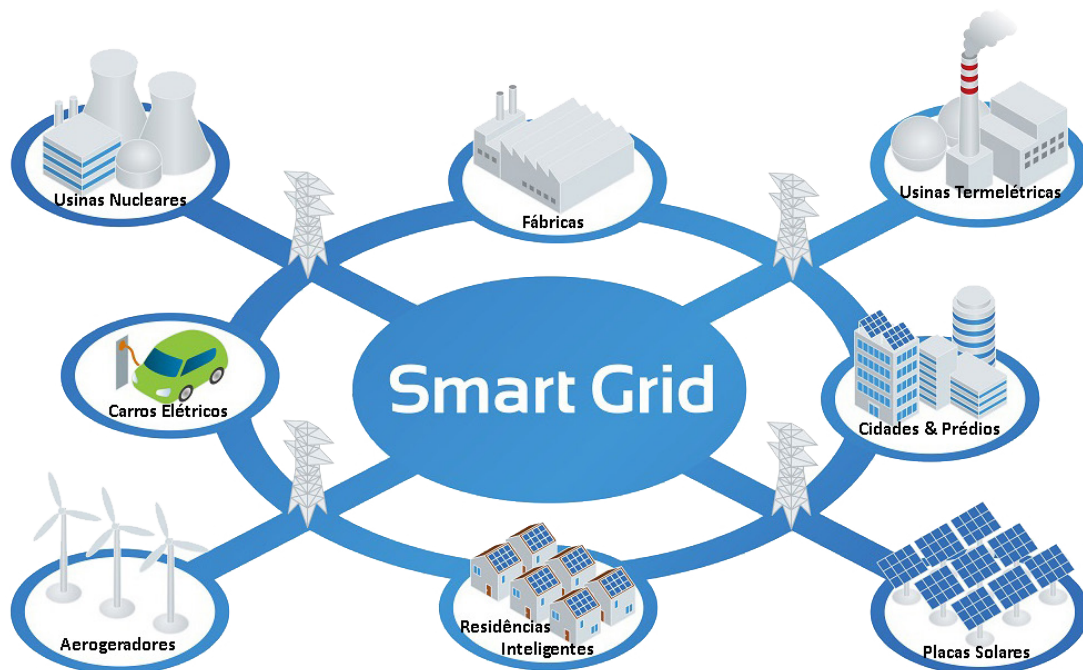


Figura 3. Sistema de rede inteligente urbano

Fonte: GTA UFRJ (2016)

Na Figura 3 é possível notar um sistema *Smart Grid*, onde existem uma cadeia de redes elétricas interligadas a uma rede inteligente que possibilita o monitoramento na geração e distribuição da energia elétrica. Na ilustração possui fazendas de geração de energia elétrica, torres de transmissão e os consumidores, todas as etapas do processo possuem dispositivos de controle e automação como, medidores, sensores, atuadores e entre outros elementos que compõem para o funcionamento da rede elétrica inteligente.

O sistema *Smart Grid* não se limita apenas na integração da energia fotovoltaica, entretanto, possibilita a integração com outros meios de produção como mostra na figura 2, usinas termoelétricas, hidroelétricas, eólicas, nucleares e entre outros meios. O processo *Smart Grid* auxilia e melhora qualquer tipo de rede elétrica, tanto para redes de produtores autônomos independentes de concessionárias elétricas *Off Grid* como produtores que híbridos *ON Grid*.

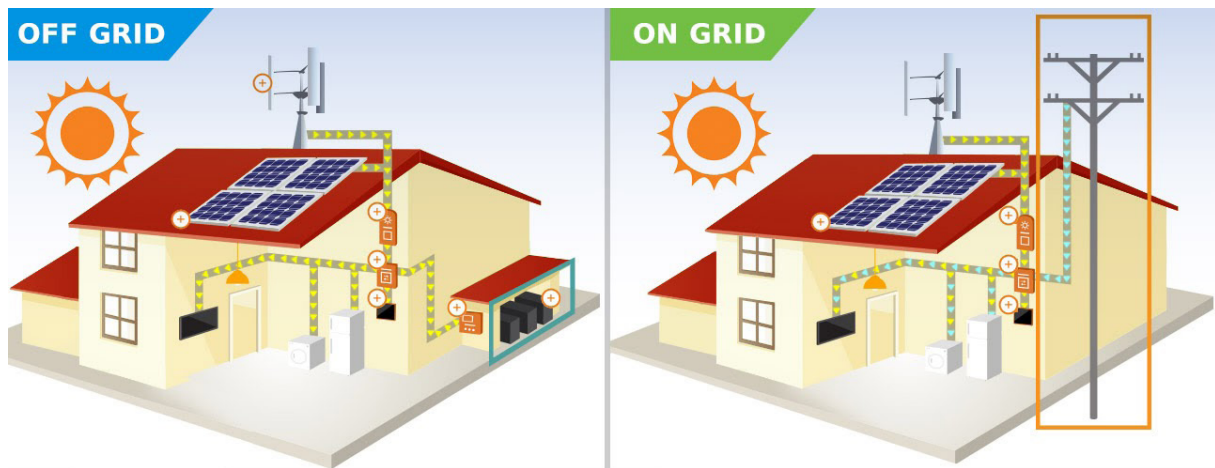


Figura 4. Sistema *Off Grid* e *On Grid* residencial

Fonte: Potência Portal (2019)

Observando na Figura 4, o sistema *Off Grid* como exemplifica na primeira ilustração, apresenta um sistema autônomo sem qualquer tipo de interligação a rede elétrica de concessionárias, no sistema *On Grid* a rede elétrica se interliga a um poste externo que dar acesso à energia elétrica de concessionárias, como mostra na segunda ilustração.

Em sistemas *Off Grid* o monitoramento de consumo e dados são de extrema importância, pois nesse modelo de sistema não há suporte de concessionárias na falta de energia elétrica. Portanto, é necessário realizar o acompanhamento do consumo diário de acordo com a quantidade produzida de energia.

O sistema *On Grid* tem o suporte parcial de concessionárias de energia elétrica em casos de falta ou altas demandas. Além também de poder devolver para a rede elétrica a sobra de energia fotovoltaica produzida, gerando assim o abatimento em desconto nas contas de energia elétrica. A devida conversão é realizada através de um inversor de frequência, que intermediou o painel elétrico e a rede externa (ALMEIDA *et al.*, 2015).

Contudo, o sistema *Smart Grid* é um conjunto de processos de tecnologias de automação, eletrônica, computação, comunicação e monitoramento que geram a otimização estratégica da rede elétrica. Por tanto o processo ocorre trocas de informações e ações na rede elétrica. Um dos equipamentos que compõe o sistema é o medidor bidirecional.



Figura 5. Medidor bidirecional

Fonte: Mitrtech (2024)

A Figura 5 mostra um medidor avançado bidirecional. Para que haja uma intercone-

xão entre o usuário e rede elétrica é necessário a integração de uma infraestrutura avançada de medição elétrica chamada (AMI), com o medidor bidirecional é possível a comunicação automatizada e bidirecional entre o usuário e a rede de fornecimento.

A estrutura avançada de medição (AMI) consiste em três redes, HAN - *Home Area Network*, NAN - *Neighbourhood Área Network* e WAN - *Wide Area Network*. Cada usuário possui sua própria rede elétrica HAN, responsável por medir o consumo e ocorrências de forma individual, nesse mesmo medidor de consumo é possível implantar os meios de geração de energia elétrica, como uma microgeração. As demais redes elétricas interligadas são chamadas de NAN, que por sua vez formam uma cadeia de informações que são geradas e enviadas para a WAN, que é a rede central de gerenciamento (PELIELO *et al.*, 2016).

O sistema fotovoltaico traz consigo alguns outros equipamentos e recursos que são inevitáveis em sua composição. Os inversores são dispositivos que agregam no sistema através da transformação da energia elétrica de corrente contínua em corrente alternada (OLIVEIRA *et al.*, 2015).



Figura 6. Inversor de frequência

Fonte: Maqpart

Na figura 6 podemos notar o inversor de frequência. A energia elétrica convertida nas placas de silício é corrente contínua CC, isso impossibilita a utilização com equipamentos domésticos padrões sendo necessário a utilização do inversor de frequência, responsáveis pela conversão de corrente contínua para corrente alternada AC.

As baterias por sua vez armazenam energia elétrica para ser utilizada quando não tiver fonte de luz solar. Enquanto no sistema *On Grid* não há necessidade de armazenamento já o sistema está interligada a uma rede secundária, no sistema *Off Grid* é necessário o armazenamento (SCHERER *et al.*, 2015).



Figura 7. Exemplo de bateria solar

Fonte: Dandaro

Para o aproveitamento da energia gerada é necessário a instalação de baterias, na Figura 7 exemplifica um dos tipos de bateria existente para módulos solares. Em um sistema fotovoltaico os carros elétricos também funcionam como um nobreak, utilizam energia elétrica para seu funcionamento e já possuem baterias interna em sua fabricação.

A integração de sistemas fotovoltaicos em redes inteligentes representa uma solução inovadora e sustentável para os desafios energéticos atuais, com um sistema de monitoramento e implementação de tecnologias de comunicação avançada permite uma coleta de dados em tempo real, esses dados podem ser usados para fim de gestão e controle na demanda de energia elétrica.

Algumas das características de suas vantagens relacionadas a *Smart Grid* são:

- Resposta a falhas no sistema: Capaz de identificar erros ou perdas no sistema, restaurando a rede elétrica.
- Capacidade de integração de outras redes: Possibilita a integração de variáveis fontes energéticas.
- Gerenciamento de produção: Viabiliza um gerenciamento mensurável quantitativo.
- Gerenciamento remoto: Gerencia de forma remota dados através de dispositivos dos consumidores.
- Redução no impacto ambiental: Visa uma melhoria na geração da qualidade de energia de forma limpa e renovável.
- Algumas das características de suas desvantagens relacionadas a *Smart Grid* são:
- Alto custo: Para viabilizar a sua instalação é necessário recursos com valor estimado de alto custo.
- Investimento a longo prazo: O retorno financeiro é a longo prazo, visando que é

necessário a utilização de vários anos para o valor do investimento seja refletido no consumo da energia elétrica.

- Risco cibersegurança: Vulnerabilidade e riscos de segurança.
- Complexidade operacional: É notável que tenha uma complexidade em sua operação

A implantação do conceito *Smart Grid* com sistemas fotovoltaicos ainda é um desafio social, o valor do investimento da infraestrutura inicial é custoso, visto que é necessário o custeio dos equipamentos como placa solares e dispositivos que complementam a instalação, além de ter gastos relacionados a manutenção e mão de obra.

Os benefícios socioeconômicos para seus usuários são ao longo prazo, já o investimento inicial é alto, porém a fonte de abastecimento para a geração é inesgotável e limpa. Todavia, os benefícios ambientais são a curto prazo, já que a utilização da nova fonte de energia elétrica passa a ser imediata, agregando positivamente ao meio ambiente.

3. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento deste presente artigo foi possível entender sobre o conceito da energia fotovoltaica e seu desenvolvimento em redes inteligentes, *Smart Grid*. Sendo assim, alcançou seu objetivo de pesquisa. Os resultados alcançados e desejados seguiram com base através de pesquisas de artigos existentes, livros e sites científicos.

O conflito e o problema de pesquisa se estendem na compreensão da integração de sistemas inteligentes em sistemas de energia fotovoltaica, ao longo da pesquisa científica mostra dados e ilustrações que auxiliam na comunicação e entendimento da leitura, além de detalhar sobre conceitos e lógicas que integram o processo da energia fotovoltaica.

Por base da pesquisa o leitor tem uma imersão de conhecimento, que é o objetivo de pesquisa, entretanto faz-se necessário a busca por mais fontes de conhecimentos relacionado ao tema, a pesquisa mostra uma perspectiva dos sistemas que compõem o sistema fotovoltaico, aborda também pontos relacionados ao gerenciamento, consumo e produção da energia renovável.

Vale lembrar que a pesquisa apresenta uma das soluções de sustentabilidade e autonomia para a energia elétrica global, um dos objetivos da ONU até 2030. Através da energia fotovoltaica é possível gerar riquezas, economia e sustentabilidade para o nosso país. Contudo, a presente pesquisa é um ponta pé inicial para o desenvolvimento e elaboração de futuras pesquisas que serão projetadas através do conhecimento alcançado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, ROSA, DIAS, BRAZ, LANA, SANTO, SACRAMENTO, Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica, **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p 7-9, 2015. (Engenharia Bioenergética)

Acordo de Paris, **Conversão quadro das nações unidas sobre clima**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html#:~:text=Na%2021%C2%AA%20Confer%C3%Ancia%20das%20Partes,os%20impactos%20decorrentes%20dessas%20mudan%C3%A7as>.

ANEEL, **Agência Nacional de Energia Elétrica**, Relatório Aneel 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>

Informação de Dados Sobre Energia Renovável. **Agência Internacional de Energia Renovável**, 2011-2022. Disponível em: <https://www.irena.org/>

FIGUEIRA, Sistema automatizado para ensaio de inversores fotovoltaicos conectados à rede em acordo com normatização brasileira, **Manancial repositório digital da UFMS**, p. 61, 2016.

MACHADO, MIRANDA, Energia solar fotovoltaica: Uma breve revisão, **Revista Virtual de Química**, v.7, n.1, p. 127, 2015. (Ano Internacional da Luz).

OLIVEIRA, SOBREIRA, COSTA, FERREIRA, PEREZ, A energia solar fotovoltaica: transformação, evolução, aspectos ambientais e abordagens em sala de aula, **Research, Society and Development**, v. 11, n.9, p.2, 2022.

OLIVEIRA, ABRITTA, FERNANDES, Energias renováveis: Estudo de caso de aplicação residencial de energia solar fotovoltaica, **Caderno em Estudos em Engenharia Elétrica**, v.3, n. 2, p. 5, 2021.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil, Agenda 2030. Nações Unidas. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>

PELIETO, ACCÁCIO, MOYSÉS. **Smart Grid Redes Inteligentes**, UFRJ, 2016. Disponível em: https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1/smartgrid/

SCHERER, SESSEGOLO, BARCAROLO, EDLER, Fonte alternativa de energia: Energia solar, **XX Seminário interinstitucional de ensino**, 2015.



Engenharia Mecânica



Resumo

Este estudo aborda a relevância da Manutenção Produtiva Total (TPM) na melhoria da qualidade dos produtos industriais, em um cenário de crescente demanda por otimização de processos e redução de custos. A pesquisa surge da necessidade de aprimorar a qualidade dos produtos, dado o aumento significativo das atividades de manutenção e a consequente produção de itens com qualidade inferior. O objetivo geral é analisar como a implementação da TPM pode influenciar positivamente a disponibilidade operacional dos equipamentos, maximizando a eficiência e minimizando falhas. A aplicação bem-sucedida da TPM mostra-se crucial para enfrentar problemas relacionados à qualidade e à manutenção de equipamentos industriais. Conclui-se que a TPM é uma ferramenta estratégica na busca pela excelência produtiva e pela competitividade industrial. Trabalhos futuros poderão explorar a integração da TPM com tecnologias avançadas da Indústria 4.0, ampliando sua eficácia.

Palavras-chave: TPM. Indústria 4.0. Gestão da Manutenção. Produção.

Abstract

This study addresses the relevance of Total Productive Maintenance (TPM) in improving the quality of industrial products, in a scenario of increasing demand for process optimization and cost reduction. The research arises from the need to improve product quality, given the significant increase in maintenance activities and the consequent production of items with inferior quality. The general objective is to analyze how the implementation of TPM can positively influence the operational availability of equipment, maximizing efficiency and minimizing failures. The successful application of TPM proves to be crucial to address problems related to the quality and maintenance of industrial equipment. It is concluded that TPM is a strategic tool in the search for productive excellence and industrial competitiveness. Future work may explore the integration of TPM with advanced technologies of Industry 4.0, increasing its effectiveness.

Keywords: TPM. Industry 4.0. Maintenance Management. Production.

1. INTRODUÇÃO

A manutenção, sendo uma peça fundamental na evolução que essa área experimentou ao longo das décadas de 40 a 70. Durante esse período, houve uma transformação significativa que enriqueceu a cadeia de produção, tornando-a altamente produtiva e padronizada. Esse processo evolutivo não se limitou apenas à execução de métodos de manutenção, mas também incorporou princípios de organização e controle de gestão em processos e serviços, consolidando-se como uma prática vital no cenário da qualidade.

A indústria moderna enfrenta desafios constantes para otimizar sua produção, reduzir custos e manter altos padrões de qualidade. Nesse contexto, a gestão eficiente da manutenção torna-se crucial para garantir o funcionamento contínuo e confiável dos equipamentos industriais. A Manutenção Produtiva Total (TPM) surge como uma abordagem abrangente que vai além da simples correção de falhas, incorporando práticas preventivas e a participação ativa dos colaboradores no processo de manutenção.

A aplicação da TPM, ao longo do tempo, tem se mostrado essencial para enfrentar diversas insatisfações relacionadas à prestação de serviços e para aprimorar a qualidade dos produtos. Essa abordagem não só atende às demandas internas de eficiência, mas também tem um impacto direto na satisfação dos clientes. Ao proporcionar produtos de melhor qualidade, a TPM torna-se uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de uma metodologia eficaz, garantindo que os produtos atendam às expectativas e necessidades do consumidor final.

A origem da problemática de pesquisa emerge da urgência de aprimorar a qualidade dos produtos, resultante do aumento significativo na demanda, que, por sua vez, tem ocasionado um crescimento proporcional nas atividades de manutenção. Este cenário de produção intensiva tem gerado uma quantidade substancial de produtos com qualidade inferior, suscitando a seguinte indagação:

Qual é a relevância da Manutenção Produtiva Total (TPM) na eficácia da gestão da manutenção industrial, considerando seus impactos na disponibilidade operacional, eficiência dos equipamentos e, conseqüentemente, na performance global da produção?

O objetivo geral deste estudo é analisar a metodologia TPM como um dos elementos cruciais para alcançar a excelência na qualidade dos produtos industriais. Para atingir esse objetivo, é essencial compreender como a implementação da TPM impacta positivamente a disponibilidade operacional dos equipamentos industriais, uma vez que essa metodologia visa maximizar a eficiência das máquinas e reduzir as falhas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, de tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi feita uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado



para busca compreendeu os últimos 10 anos. Além disso, foram consultados livros de renomados autores da área de manutenção produtiva total, como Abdon (2019), Pereira (2019), Costa (2018), entre outros, a fim de enriquecer e fundamentar a análise.

2.2. Resultados e Discussão

O termo “manutenção” tem suas raízes no vocabulário militar, originalmente designando a tarefa de manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material em um nível constante de prontidão. Ao longo do tempo, essa concepção evoluiu para uma abordagem mais complexa e abrangente, exigindo uma análise estrutural para alcançar a excelência nos processos administrativos e operacionais no campo da manutenção (Wyrebsk, 2017).

De acordo com Wyrebsk (2017), a partir da década de 1950, nos Estados Unidos, houve uma aplicação mais enfática desses conhecimentos. Esse período coincidiu com o desenvolvimento tecnológico do pós-guerra, tornando-se imperativo separar a área de manutenção da produção com o objetivo de aprimorar o desempenho do sistema produtivo.

A trajetória, visando aprimorar seu desempenho e alcançar resultados mais eficazes para o controle de manutenção. A gestão desempenha um papel crucial na implementação bem-sucedida da TPM, contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade na forma como as manutenções são gerenciadas (Gonçalves, 2020).

Segundo Gonçalves (2020), a TPM é uma abordagem de gestão que atua como um mecanismo de controle na manutenção, visando a redução de acidentes, defeitos e falhas durante o reparo de equipamentos. Utilizando conceitos e práticas específicos, busca-se maior disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

As classificações das manutenções, como corretiva, preditiva, preventiva ou autônoma, desempenham papéis distintos na elevação do desempenho de máquinas em diversas indústrias. O propósito é reduzir as falhas em equipamentos e componentes mecânicos (Pivetta, 2020). Conforme o autor Pivetta (2020), é notável que as formas de manutenção, como corretiva, preditiva e preventiva, desempenham um papel fundamental na redução das interferências na produção. Destaca-se a importância de aumentar as ações preventivas, contribuindo para uma produção de melhor qualidade e produtos mais robustos.

A exploração de novos métodos de aplicação de ferramentas de gestão é uma possibilidade a ser considerada, visando a redução de falhas e o desenvolvimento de abordagens inovadoras para aumentar a disponibilidade de máquinas ou equipamentos que apresentem condições desfavoráveis em relação à eficiência de produção (Faria, 2022).

De acordo com Costa (2018), a implementação de uma sistemática contínua é essencial para manter a equipe constantemente engajada, promovendo o aprimoramento contínuo. Os resultados alcançados são frutos da perseverança e dos esforços diários de todos os colaboradores, independentemente de sua posição hierárquica.

Não é imprescindível iniciar uma empresa a partir do zero para incorporar a Mentalidade de Produção Total (TPM) em sua cultura organizacional. A TPM é um sistema concebido para otimizar resultados em empresas já estabelecidas, visando a satisfação do consumidor final. É fundamental monitorar o desempenho dos equipamentos desde o início, uma vez que requer conhecimento e experiência daqueles que operam as máquinas diariamente. Portanto, a criação de novas máquinas pode tornar-se infrutífera sem o prévio entendimento das equipes envolvidas (Costa, 2018, p.32).

Dentro das diversas categorias de tipos de manutenção, estão incluídas as diferentes abordagens para a execução de cada modalidade de manutenção. A confiabilidade, por sua vez, refere-se à capacidade de um item desempenhar sua função exigida em condições específicas durante um intervalo de tempo determinado. Em uma pesquisa recente, ressaltou-se que a abordagem preventiva pode contribuir significativamente para aumentar a confiabilidade, ao identificar previamente componentes propensos a falhas futuras (Costa, 2018).

A implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM) pode desempenhar um papel crucial no aprimoramento do desempenho das empresas em relação aos indicadores de qualidade de manutenção mais relevantes, como tempo médio entre falhas, tempo médio de reparo, disponibilidade física e confiabilidade, reduzindo assim o número de falhas (Pereira, 2019).

A melhoria da confiabilidade das máquinas pode resultar na redução dos custos associados a manutenções com paradas não programadas, responsabilizando os times de manutenção e operação. Isso implica o envolvimento de toda a organização na busca de um modelo de manutenção que visa alcançar zero defeitos, zero falhas e zero acidentes (Rodrigues, 2022).

De acordo com Pereira (2019), a proposta desse sistema de manutenção, baseado nas normas da Manutenção Produtiva Total, apresenta contribuições significativas para o sucesso de uma empresa, melhorando a qualidade da manutenção por meio da implementação eficaz da TPM.

Durante a análise realizada, constatou-se que o êxito na aplicação da TPM requer a participação de todos os membros da organização. Portanto, é crucial que a manutenção autônoma receba total apoio por parte dos operadores das máquinas, com o respaldo da direção, gestores de qualidade, gestores de produção e responsáveis pela manutenção do setor (Abdon, 2019).

Havia uma percepção entre os operadores de máquinas de que seu trabalho já exigia esforço significativo e que poderiam ser mais cobrados pela direção caso ocorressem falhas nas máquinas sob sua supervisão. Essa atitude refletia claramente um sentimento de resistência, com frases como “isso não faz parte da minha função” sendo expressas. Contudo, as reuniões realizadas antes do lançamento do programa de Manutenção Autônoma (MA) desempenharam um papel crucial ao conscientizar todos os envolvidos sobre a relevância da Manutenção Autônoma e os impactos positivos esperados com a implementação do programa (Abdon, 2019, p.28).

Conforme o autor Abdon (2019), ao longo das fases de implementação da Manutenção Autônoma, percebeu-se que, inicialmente, não se exigia um conhecimento aprofundado para as tarefas, mas que poderiam adquirir maior expertise ao longo do desenvolvimento das atividades. Isso proporcionava a possibilidade de começarem a realizar algumas manutenções preventivas iniciais.

Segundo Silva e Junior (2022), como uma metodologia com ferramentas de melhoria contínua, a TPM se destaca no setor de manutenção, priorizando o pilar da Manutenção Autônoma como um elemento transformador fundamental. A aplicação dessa metodologia varia de acordo com a estrutura organizacional das empresas, sendo adaptada conforme a visão de cada setor e as orientações recebidas.

A abordagem da TPM tem como objetivo principal eliminar as causas de quebras e



defeitos, possibilitando a implementação de manutenções planejadas e programadas. O conceito de Kaizen está interligado à TPM, na medida em que ambos buscam a melhoria contínua de máquinas e equipamentos, visando prevenir quebras e perdas nos processos, além de reduzir o tempo necessário para ajustes e manutenções não programadas (Baldissarelli; Fabro, 2019).

A TPM é mais do que uma simples prática de manutenção; é uma filosofia gerencial que influencia a forma organizacional e o comportamento das pessoas. Sua aplicação não se limita apenas à manutenção para resolver problemas, mas permeia todo o processo produtivo, envolvendo todos os colaboradores em uma cadeia produtiva integrada (Baldissarelli; Fabro, 2019).

Conforme explicado por Silva (2017), a filosofia TPM promove uma transformação nos colaboradores, gerando um senso de comprometimento de todos os funcionários. Isso resulta em uma maior responsabilidade sobre as operações realizadas, com o compromisso de solucionar problemas ou comunicar aqueles que podem resolvê-los. Dessa forma, a TPM influencia as pessoas em prol do bem comum dentro da organização (Silva, 2017).

Diante desses comportamentos observados nas organizações, tornou-se evidente a necessidade de controlar e gerir as informações por meio de ferramentas de gestão que desempenhassem um papel transformador e promovessem a melhoria contínua para impulsionar a produção, mantendo simultaneamente a limpeza e a organização (Saruva, 2017). Parte superior do formulário

Na utilização eficiente dos equipamentos, resultando em um aumento da produção devido à melhor dimensionamento dos mesmos, além de manutenções aprimoradas com o uso de peças de reposição de qualidade superior (Wyrebsk, 2017).

A qualidade do serviço como um todo experimenta um aperfeiçoamento exponencial. Há uma elevação na interação entre os colaboradores e os equipamentos, promovendo um ambiente mais organizado e propício para o trabalho, o que contribui para a eliminação de acidentes e custos reduzidos (Wyrebsk, 2017).

De acordo com Mendes et al. (2024), a abordagem da TPM visa eliminar as causas de quebras e defeitos, facilitando a implementação de manutenções planejadas e programadas. A filosofia Kaizen está alinhada à TPM, buscando continuamente aprimorar máquinas e equipamentos para evitar quebras e perdas nos processos, reduzindo o tempo necessário para ajustes e manutenções mal programadas.

A metodologia mantém uma estreita relação com o 5S, incorporando a conhecida postura de organização, limpeza, descarte e promoção da saúde para um desenvolvimento eficaz. Nesse sentido, considera-se essa norma como um complemento valioso para a ferramenta TPM (Mendes et al., 2024).

Segundo Suzuki (2014), para eliminar as seis grandes perdas dos equipamentos no TPM, é essencial implementar as oito atividades conhecidas como os 8 pilares de sustentação do desenvolvimento do TPM. Inicialmente, o TPM contava apenas com cinco pilares, que eram considerados fatores básicos para sustentar o desenvolvimento da metodologia.

Posteriormente, foram acrescentadas três novas atividades ou pilares: manutenção voltada para a melhoria da qualidade; gerenciamento; e segurança, higiene e meio ambiente. Esses oito pilares do TPM contribuem significativamente para a eficiência da manutenção. Cada pilar tem um objetivo específico, focando, de modo geral, na eliminação das causas de defeitos e falhas dos equipamentos, por meio de um sistema de manutenção alinhado às necessidades de produção (Suzuki, 2014). A Figura 1 ilustra os pilares do TPM.

Figura 1. Pilares da TPM

Fonte: Suzuki (2014, p.2)

De acordo com Suzuki (2014), ressalta que o TPM exige investimentos em treinamento e capacitação. Sem esses investimentos, os operadores não terão o conhecimento necessário para realizar a manutenção preventiva de rotina. Portanto, é essencial que todos os profissionais envolvidos com os equipamentos sejam treinados e capacitados para conhecer a máquina e identificar problemas rapidamente.

Suzuki (2014) destaca que a administração das empresas deve colaborar de forma integrada com os demais departamentos. Em razão dessa necessidade, o TPM se preocupa em fornecer todas as informações e recursos necessários para cada serviço realizado pelos diferentes setores da organização.

Segundo Tavares (2014), é a área de manutenção quem carrega as maiores responsabilidades da TPM. Desse modo, devido a área de manutenção histórica e técnica dominar de fato as propriedades dos equipamentos, é atribuída a mesma a responsabilidade de fazer o TPM, sem que se tenha um maior comprometimento por parte das outras áreas da empresa, sobretudo a de produção e engenharia.

A Manutenção Produtiva Total (TPM) é fundamental na gestão eficaz da manutenção industrial, pois visa maximizar a eficiência dos equipamentos e aumentar a disponibilidade operacional. Ao envolver todos os funcionários, do chão de fábrica à gestão, a TPM promove um ambiente de colaboração, onde cada indivíduo contribui para a manutenção e o cuidado com os equipamentos. Isso garante que problemas sejam identificados precocemente, reduzindo o tempo de inatividade e melhorando a performance global da produção (Díaz-Reza *et al.*, 2018).

Além disso, a TPM foca na eliminação de desperdícios e ineficiências, como o retrabalho, o tempo ocioso e os defeitos de produção. Ao identificar e eliminar essas fontes de perda, a TPM promove o aumento da produtividade e a redução dos custos operacionais. Isso é crucial para que as indústrias mantenham um alto nível de competitividade no mercado, ao garantir um fluxo produtivo constante e eficiente (Mendes, 2024).

Outro aspecto relevante da TPM é o impacto na qualidade dos produtos. Como mencionado por Mukhedkar (2020), a manutenção da qualidade trabalha em conjunto com a manutenção planejada para eliminar não conformidades. Com máquinas funcionando de forma eficiente e constante, os produtos fabricados apresentam menos defeitos, o que eleva a satisfação do cliente e agrega valor ao negócio.

A TPM também tem um papel importante na evolução da manutenção, de uma abor-

dagem reativa para uma proativa. Ao treinar equipes para monitorar e realizar manutenção preventiva, a indústria pode antecipar-se a possíveis problemas, ao invés de agir somente após uma falha. Isso resulta em maior confiabilidade dos equipamentos e na melhoria contínua dos processos produtivos (Faria, 2022).

O impacto direto da TPM na disponibilidade operacional dos equipamentos não pode ser subestimado. Com máquinas em funcionamento por mais tempo e com menos interrupções, a capacidade produtiva da fábrica aumenta, o que leva a uma melhoria significativa na performance global. Isso é especialmente importante em ambientes de produção onde a continuidade é essencial para atender à demanda (Abreu, 2018).

A TPM é uma estratégia abrangente que vai além da simples manutenção de equipamentos. Ela visa maximizar a eficiência dos equipamentos, reduzir falhas e desperdícios, melhorar a qualidade dos produtos e, acima de tudo, promover uma cultura de melhoria contínua na produção. Isso a torna essencial para a gestão eficaz da manutenção industrial e para o sucesso das operações fabris (Costa, 2018).

3. CONCLUSÃO

Através de uma análise detalhada da literatura, foi possível observar que a TPM, ao reduzir falhas e melhorar o desempenho dos ativos, promove um ambiente produtivo e organizado, alinhado com os objetivos estratégicos de empresas que buscam competitividade e eficiência operacional. Este trabalho destaca que a implementação da TPM requer uma transformação cultural e engajamento de toda a equipe, do chão de fábrica à alta gestão, para maximizar os resultados.

Contudo, algumas limitações foram encontradas, especialmente no acesso a estudos empíricos que comprovem a eficácia da TPM em setores fora da indústria de manufatura, o que restringiu a aplicação dos conceitos a contextos específicos. Além disso, dificuldades metodológicas surgiram ao se tratar de conceitos que variam de acordo com a maturidade das empresas em relação às práticas de manutenção e à capacidade de absorver inovações tecnológicas. Essas limitações indicam a necessidade de pesquisas mais amplas que possam abranger um leque maior de indústrias e validar os resultados em diferentes contextos.

Para responder ao problema de pesquisa, verificou-se que a TPM é uma metodologia eficaz quando aplicada com compromisso e adaptação à realidade de cada organização, reforçando sua relevância para a maximização da vida útil dos equipamentos e redução de custos operacionais. Recomenda-se, no entanto, que as empresas desenvolvam programas contínuos de capacitação e engajamento dos funcionários, uma vez que o sucesso da TPM depende, em grande parte, do envolvimento de todos os níveis hierárquicos.

Como propostas para estudos futuros, sugere-se investigar a aplicação da TPM em setores de serviços e sua integração com tecnologias emergentes da Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial, para potencializar a manutenção preditiva e preventiva. Esses avanços podem trazer novas perspectivas para a TPM, oferecendo soluções que vão além da manutenção tradicional e que poderão impactar diretamente a sustentabilidade e a eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- ABDON, F. F. **Implantação da manutenção autônoma**: um estudo de caso na indústria de alimentos. Universidade Federal Campina Grande. Disponível em: Acessado em: 15. fev. 2024.
- ABREU, Pedro Henrique Camargo de. Perspectivas para a Gestão do Conhecimento no Contexto da Indústria 4.0. **South American Development Society Journal**, v. 4, n. 10, p. 126-145, 2018.
- BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. Manutenção Preditiva na indústria 4.0. **Scientia cum industria**, v. 7, n. 2, p. 11-22, 2019.
- COSTA, Eduardo Livi. **Manutenção produtiva total no setor de fundição de alta pressão em uma fábrica de louças sanitárias–estudo de caso**. 2018.
- DÍAZ-REZA, J.R. *et al.* The role of managerial commitment and TPM implementation strategies in productivity benefits. **Applied Sciences**, v.8, n.7, p.1153, 2018.
- FARIA, Viviane Pereira de. **Proposta de sistemática para gestão de manutenção no ambiente organizacional e tecnológico da indústria 4.0**. 2022.
- GONÇALVES, Hélder Ricardo Domingues. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. Tese de Doutorado.
- MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.; HYNDMAN, R.J. **Forecasting Methods and Applications**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- MENDES, David Samuel Fernandes Tavares et al. **Manutenção Lean em Ambiente de Indústria 4.0**. 2024.
- MUKHEDKAR, D.K. Impact of TPM Implementation on Organization Competitiveness. **International Journal of Research and Analytical Reviews**, v. 28, n.1, p.37-57, 2022.
- PELLEGRINI, F.R.; FOGLIATTO, F. Estudo comparativo entre modelos de Winters e de Box-Jenkins para a previsão de demanda sazonal. **Revista Produto & Produção**, v. 4, número especial, p.72-85, 2000.
- PEREIRA, Y. C. **Aplicação da manutenção produtiva total e suas influências na qualidade da manutenção**: estudo de múltiplos casos. Universidade de Ouro Preto_MG. Disponível em: Acessado em: 15. fev. 2024.
- PIVETTA, M. D. **Desenvolvimento de planejamento de manutenção aplicado a máquina crítica de empresa metal mecânica**. Universidade Caxias do Sul. Disponível em: Acessado em 13. fev. 2024.
- RODRIGUES, Hugo Mestre. **Desafios da Indústria 4.0**: Aplicada à Gestão da Manutenção na Indústria Vidreira: O Caso de Estudo da BA Glass Portugal, SA. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa (Portugal).
- SARUVA, R. C. L. **Proposta de melhoria na organização do setor de manutenção através do programa 5s**: um estudo de caso em uma microempresa do setor de máquinas e ferramentas. Universidade tecnologia do Paraná. Disponível em: Acessado em: 16. fev. 2024.
- SILVA, Natália Aragão; JUNIOR, Marcos Wagner Jesus Servare. O planejamento do processo de manutenção na era da indústria 4.0: método Proknow-C. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 8, n. 3, p. 149-160, 2022.
- SILVA, R. L. **Implantação Da Metodologia Tpm**: estudo em um equipamento de uma indústria alimentícia de água mineral. Universidade de Taubaté-SP.
- SINGH, J.; SINGH, H. Justification of TPM pillars for enhancing the performance of manufacturing industry of Northern India. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2019.
- WYREBSK, J. **Manutenção Produtiva Total**. Um Modelo Adaptado. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2022. Disponível em: Acessado em 05. fev. 2024.





O IMPACTO DA TECNOLOGIA E AUTOMAÇÃO NA SOCIEDADE CONTEMPORÂNEA

THE IMPACT OF TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN CONTEMPORARY
SOCIETY

Benison Victor Barros dos Santos

24

Resumo

Este artigo analisa o impacto crescente da tecnologia e da automação na sociedade contemporânea, focando em suas implicações na eficiência operacional das empresas e nas relações de trabalho. O estudo investiga como essas inovações estão transformando indústrias e quais são os efeitos para os trabalhadores e para a sociedade. A pesquisa utiliza uma revisão bibliográfica de fontes recentes, permitindo uma análise detalhada das tendências e impactos da automação. Os resultados indicam que a automação promove ganhos significativos em produtividade e eficiência operacional, no entanto, também apresenta desafios consideráveis, como a necessidade de requalificação da força de trabalho e o aumento da desigualdade social. Além disso, a automação pode levar ao deslocamento de trabalhadores, especialmente em empregos de baixa qualificação, aumentando a pressão sobre políticas de requalificação profissional e inclusão digital. As conclusões sugerem que é essencial que governos e empresas desenvolvam estratégias abrangentes que promovam a inclusão e a equidade no mercado de trabalho, especialmente à medida que tecnologias emergentes como a inteligência artificial e o aprendizado de máquina continuam a avançar. Este trabalho pretende contribuir para a compreensão das transformações impulsionadas pela automação e suas consequências para o futuro do trabalho, ressaltando a importância de políticas públicas eficazes para mitigar os efeitos negativos e maximizar os benefícios das novas tecnologias.

Palavras-chave: Tecnologia, Automação, Mercado de Trabalho, Requalificação Profissional, Inteligência Artificial.

Abstract

This article analyzes the growing impact of technology and automation in contemporary society, focusing on their implications for business operational efficiency and labor relations. The study examines how these innovations are transforming industries and what effects they have on workers and society. Utilizing a bibliographic review of recent sources, this research provides a detailed analysis of automation trends and impacts. The findings indicate that while automation significantly enhances productivity and operational efficiency, it also presents substantial challenges, such as the need for workforce retraining and the increase in social inequality. Additionally, automation may lead to worker displacement, particularly in low-skill jobs, intensifying the demand for professional retraining and digital inclusion policies. The conclusions suggest that it is essential for governments and companies to develop comprehensive strategies that promote inclusion and equity in the labor market, especially as emerging technologies like artificial intelligence and machine learning continue to advance. This work aims to contribute to the understanding of the transformations driven by automation and their consequences for the future of work, highlighting the importance of effective public policies to mitigate negative effects and maximize the benefits of new technologies.

Keywords: Technology, Automation, Labor Market, Professional Retraining, Artificial Intelligence.



1. INTRODUÇÃO

A automação tem sido um dos principais motores de transformação nas indústrias ao longo das últimas décadas. Com o avanço das tecnologias, como a inteligência artificial e a robótica, a automação se tornou uma ferramenta essencial para aumentar a produtividade, reduzir custos operacionais e melhorar a qualidade dos produtos e serviços (Brynjolfsson & McAfee, 2014). O impacto dessas tecnologias não se limita apenas ao setor industrial, mas se estende a diversos aspectos da sociedade, desde o mercado de trabalho até a estrutura econômica global.

A capacidade da automação de realizar tarefas repetitivas com precisão e velocidade, por exemplo, permite às empresas otimizar processos e alocar recursos humanos em funções mais estratégicas (Groover, 2021). Contudo, essa transformação também levanta questões importantes sobre o deslocamento de trabalhadores, desigualdade social e a necessidade de requalificação profissional (Frey; Osborne, 2017).

Diversos estudos têm explorado os impactos da automação sob diferentes perspectivas. Ford (2018) destaca que, apesar dos benefícios em eficiência, a automação pode exacerbar a desigualdade social ao concentrar riqueza em grupos específicos. Por outro lado, Acemoglu e Restrepo (2020) apontam que a automação pode criar novas oportunidades de trabalho que exigem habilidades especializadas e criativas, ressaltando a importância de uma transição bem planejada e adaptativa para maximizar seus benefícios. Da mesma forma, Mokyr, Vickers e Ziebarth (2015) analisam a história da ansiedade tecnológica e argumentam que, embora os medos iniciais possam ser intensos, a adaptação tecnológica acaba por gerar novas formas de emprego e crescimento econômico.

Neste contexto, é fundamental compreender tanto os benefícios quanto os desafios que a automação apresenta. Através de uma análise detalhada, este estudo busca entender como as empresas podem se adaptar a essas mudanças, ao mesmo tempo em que promovem um ambiente de trabalho inclusivo e equitativo. Além disso, serão discutidas as políticas públicas necessárias para mitigar os efeitos negativos da automação e maximizar seus benefícios para toda a sociedade.

2. IMPACTO DA AUTOMAÇÃO NA PRODUTIVIDADE

A automação tem se destacado como um dos principais motores de transformação nas indústrias modernas, promovendo ganhos significativos em produtividade e eficiência operacional. Segundo Brynjolfsson e McAfee (2014), a automação tem sido um dos pilares centrais da transformação produtiva nas últimas décadas, permitindo que empresas de diversos setores implementem processos mais ágeis e precisos. Essa automação abrange desde a utilização de robôs em linhas de montagem até a implementação de softwares avançados para a gestão de operações.

Um dos principais benefícios da automação é a capacidade de realizar tarefas repetitivas e demoradas com uma precisão e velocidade que seriam impossíveis para os seres humanos. Isso não só reduz os custos operacionais, mas também minimiza os erros e desperdícios, resultando em uma produção mais eficiente e de maior qualidade. Por exemplo, em indústrias manufatureiras, robôs podem trabalhar incessantemente sem a necessidade de pausas, o que aumenta consideravelmente a produção.

Da mesma maneira, a automação permite que as empresas reorientem seus recursos

humanos para funções mais estratégicas e criativas, que exigem habilidades cognitivas avançadas e tomadas de decisão complexas. Esse realocamento de funções pode aumentar a inovação dentro das empresas, à medida que os trabalhadores se concentram em atividades que agregam maior valor ao produto final.

Contudo, o impacto da automação na produtividade não é uniforme e pode variar de acordo com o setor e a maturidade tecnológica das empresas. Em setores altamente automatizados, como a indústria automobilística, os ganhos de produtividade são mais evidentes. Já em setores que ainda estão em processo de transição para a automação, como alguns segmentos do setor de serviços, os benefícios podem ser menos perceptíveis no curto prazo.

Estudos também apontam para um fenômeno conhecido como “paradoxo da produtividade”, onde, apesar do rápido avanço da automação e da inteligência artificial, os aumentos de produtividade agregados ainda não se refletem plenamente nas estatísticas econômicas. Brynjolfsson, Rock e Syverson (2017) sugerem que essa aparente contradição pode ser explicada pela adaptação necessária das empresas e da força de trabalho às novas tecnologias, o que pode levar algum tempo antes que os ganhos de produtividade sejam totalmente percebidos.

Em suma, a automação representa uma oportunidade significativa para a melhoria da produtividade empresarial, mas também traz desafios que precisam ser gerenciados para que seus benefícios sejam plenamente aproveitados. É fundamental que as empresas invistam não apenas em tecnologias avançadas, mas também na capacitação de seus funcionários para garantir uma transição suave e eficaz para um ambiente de trabalho automatizado.

2.1 Riscos e Desafios da Automação

Embora a automação ofereça inúmeros benefícios em termos de produtividade e eficiência, ela também traz uma série de riscos e desafios que precisam ser cuidadosamente considerados. Um dos principais riscos associados à automação é a vulnerabilidade a falhas técnicas e ataques cibernéticos. Groover (2021) destaca que, à medida que as empresas se tornam cada vez mais dependentes de sistemas automatizados, elas também se tornam mais suscetíveis a interrupções causadas por falhas no sistema ou invasões de hackers. Isso pode resultar em paradas significativas na produção e em perdas financeiras consideráveis.

Além das vulnerabilidades técnicas, a automação pode levar a um deslocamento significativo da força de trabalho. Em setores onde a automação substitui tarefas humanas, os trabalhadores de baixa qualificação são especialmente vulneráveis. Frey e Osborne (2017) afirmam que empregos repetitivos e de baixa qualificação estão particularmente suscetíveis à substituição por sistemas automatizados e inteligência artificial. Isso levanta preocupações sobre o aumento do desemprego e a necessidade urgente de requalificação dos trabalhadores para que possam se adaptar às novas demandas do mercado de trabalho.

Outro desafio importante é a crescente desigualdade social. A automação tende a beneficiar principalmente as empresas e trabalhadores altamente qualificados, que podem aproveitar as novas tecnologias para aumentar sua produtividade e renda. Por outro lado, trabalhadores de baixa qualificação e setores mais tradicionais podem enfrentar dificuldades para se adaptar, resultando em uma maior disparidade de renda e oportunidades. Essa desigualdade pode gerar tensões sociais e econômicas, exigindo uma resposta coordena-



da de políticas públicas para promover a inclusão e equidade no mercado de trabalho.

Da mesma forma, a dependência crescente de sistemas automatizados também implica a necessidade de investimentos contínuos em segurança digital e em inovações tecnológicas para evitar interrupções que possam impactar gravemente a produção. Empresas precisam desenvolver estratégias robustas de gestão de risco e implementar medidas de segurança cibernética eficazes para proteger seus sistemas contra ameaças externas.

Arntz, Gregory e Zierahn (2016) exploram a variabilidade dos impactos da automação em diferentes países, destacando que o risco de automação para empregos varia consideravelmente entre as economias da OCDE, exigindo políticas adaptativas para mitigar esses efeitos.

Em resumo, embora a automação ofereça oportunidades significativas para melhorar a eficiência e produtividade, ela também apresenta desafios consideráveis que precisam ser gerenciados. É fundamental que empresas e governos trabalhem juntos para desenvolver políticas e estratégias que mitiguem os riscos associados à automação, promovendo um ambiente de trabalho seguro e equitativo.

2.2 Impactos Sociais e Desigualdade

A automação e o avanço tecnológico têm o potencial de transformar profundamente a sociedade, trazendo tanto benefícios quanto desafios significativos, especialmente no que diz respeito à desigualdade social. Ford (2018) destaca que, embora a automação impulsione a eficiência e a produtividade, ela também levanta questões complexas sobre a redistribuição de riqueza e oportunidades.

Um dos impactos sociais mais evidentes da automação é o deslocamento de trabalhadores. À medida que tarefas repetitivas e de baixa qualificação são automatizadas, muitos trabalhadores encontram suas funções sendo substituídas por máquinas. Isso é particularmente preocupante em setores como a manufatura e o varejo, onde a automação já começou a reduzir a demanda por mão de obra humana. Frey e Osborne (2017) argumentam que a automação pode exacerbar a desigualdade social ao deslocar trabalhadores de baixa qualificação, que muitas vezes não têm acesso a oportunidades de requalificação e educação continuada.

Além do deslocamento de trabalhadores, a automação também pode aumentar a concentração de riqueza entre aqueles que possuem as habilidades e os recursos para desenvolver e implementar novas tecnologias. Trabalhadores altamente qualificados e proprietários de empresas de tecnologia tendem a se beneficiar desproporcionalmente das eficiências e economias de escala proporcionadas pela automação. Isso pode levar a uma polarização cada vez maior entre os trabalhadores de alta e baixa qualificação, resultando em disparidades econômicas significativas.

Outro aspecto crucial é a necessidade urgente de requalificação profissional. À medida que a automação avança, é imperativo que os trabalhadores adquiram novas habilidades que complementem as tecnologias emergentes. Isso inclui não apenas habilidades técnicas, mas também habilidades cognitivas avançadas, como resolução de problemas complexos e criatividade, áreas onde a automação ainda não pode substituir completamente o trabalho humano. Iniciativas de requalificação e políticas públicas focadas em educação continuada são essenciais para ajudar os trabalhadores a se adaptarem às novas demandas do mercado de trabalho.

Os impactos sociais da automação também se manifestam nas mudanças na estrutu-

ra do mercado de trabalho. Acemoglu e Restrepo (2020) apontam que, embora a automação substitua empregos em determinados setores, ela também cria novas oportunidades em áreas que exigem habilidades criativas e interação humana. No entanto, a transição para essas novas oportunidades pode ser desafiadora para muitos trabalhadores, especialmente aqueles que enfrentam barreiras de acesso à educação e formação profissional.

Seguindo tal lógica, a desigualdade geográfica pode ser acentuada pela automação. Regiões com economias dependentes de indústrias tradicionais podem sofrer mais com o deslocamento de trabalhadores, enquanto áreas metropolitanas com maior acesso a tecnologia e educação podem se beneficiar mais dos avanços automáticos. Isso reforça a necessidade de políticas regionais específicas que abordem as particularidades de cada localidade, promovendo um desenvolvimento mais equilibrado.

Alidadi (2023) destaca a importância de políticas de requalificação que ajudem os trabalhadores a adquirir novas habilidades técnicas e a se adaptar às mudanças trazidas pela automação. Adicionalmente, Brown e Keep (2018) sugerem que a educação contínua e o desenvolvimento de novas habilidades são essenciais para mitigar os impactos negativos da automação e promover um mercado de trabalho mais equitativo.

Em síntese, os impactos sociais da automação são profundos e complexos. Embora ofereça oportunidades significativas para o aumento da produtividade e eficiência, a automação também apresenta desafios consideráveis em termos de desigualdade social e redistribuição de riqueza. Para que os benefícios da automação sejam amplamente compartilhados, é crucial que governos, empresas e instituições educacionais trabalhem juntos para desenvolver estratégias que promovam a inclusão, equidade e requalificação no mercado de trabalho.

2.3 Criação de Novas Oportunidades de Trabalho

A automação, enquanto substitui algumas funções, também cria novas oportunidades de trabalho que exigem habilidades especializadas e criativas. Acemoglu e Restrepo (2020) enfatizam que, embora a automação substitua empregos em certos setores, ela simultaneamente gera demandas em áreas que valorizam competências que máquinas ainda não conseguem replicar plenamente, como criatividade e tomada de decisão complexa.

Em setores emergentes, como biotecnologia, inteligência artificial e cibersegurança, a automação impulsiona a necessidade de profissionais qualificados para desenvolver, implementar e manter tecnologias avançadas. Por exemplo, a implementação de sistemas automatizados em fábricas não elimina a necessidade de trabalhadores, mas cria a demanda por técnicos especializados que possam operar, monitorar e reparar esses sistemas. Esta mudança representa uma evolução no perfil das ocupações, onde habilidades técnicas e de engenharia se tornam essenciais.

A automação também abre portas para novas formas de emprego. O crescimento de setores como o comércio eletrônico e a economia de plataforma exemplifica como as tecnologias emergentes podem criar mercados de trabalho completamente novos. Profissionais em áreas como marketing digital, análise de dados e desenvolvimento de aplicativos encontram novas oportunidades à medida que as empresas buscam se adaptar e aproveitar as vantagens oferecidas pela automação e digitalização.

A demanda por habilidades relacionadas à gestão de tecnologias automatizadas está crescendo. Trabalhadores que podem integrar e gerenciar sistemas complexos, analisar



grandes volumes de dados e otimizar processos automatizados são altamente valorizados. Empresas estão investindo em programas de treinamento e desenvolvimento profissional para capacitar seus empregados, garantindo que possam acompanhar as rápidas mudanças tecnológicas.

Ross (2016) argumenta que as “indústrias do futuro” serão moldadas pela inovação tecnológica, criando uma demanda exponencial por habilidades específicas em setores altamente tecnológicos. À medida que a automação evolui, surge a necessidade de profissionais que entendam a tecnologia e possam desenvolver soluções inovadoras para os desafios emergentes.

A transição para essas novas oportunidades de trabalho requer um esforço conjunto entre governos, empresas e instituições educacionais. Investir em programas de educação e requalificação que preparem a força de trabalho para as novas habilidades exigidas pelas tecnologias é fundamental. Políticas públicas focadas na educação contínua e na formação técnica são essenciais para assegurar que os benefícios da automação sejam amplamente distribuídos e que a força de trabalho esteja preparada para as oportunidades do futuro.

Chui, Manyika e Miremadi (2016) destacam que, embora a automação substitua certos empregos, ela também cria oportunidades em áreas onde a intervenção humana é insubstituível, como na resolução de problemas complexos e na criatividade. As novas demandas tecnológicas reforçam a importância de habilidades humanas únicas e de educação continuada.

Concluindo, a automação não apenas substitui funções, mas também catalisa a criação de novas oportunidades de trabalho que valorizam habilidades criativas e especializadas. O desenvolvimento de políticas de requalificação e a promoção de uma educação adaptada às necessidades do mercado tecnológico são cruciais para garantir que os trabalhadores possam se beneficiar das novas possibilidades trazidas pela automação.

2.4 Variabilidade dos Efeitos da Automação

Os efeitos da automação não são uniformes e podem variar significativamente de acordo com diversos fatores, incluindo localização geográfica, contexto econômico e setor industrial. Autor, Dorn e Hanson (2013) destacam que a automação pode ter impactos diferentes dependendo da estrutura econômica e do nível de desenvolvimento tecnológico das regiões.

Em economias desenvolvidas, a automação tende a substituir funções repetitivas e de baixa qualificação, enquanto promove a criação de empregos em setores que exigem habilidades avançadas e criatividade. No entanto, em economias em desenvolvimento, a transição pode ser mais desafiadora devido à menor disponibilidade de infraestrutura tecnológica e programas de requalificação.

A natureza do setor também influencia a variabilidade dos impactos. Setores altamente automatizáveis, como a manufatura, podem experimentar uma transformação mais rápida e significativa. Por outro lado, setores que dependem fortemente da interação humana e habilidades sociais, como saúde e educação, podem ver uma adoção mais lenta da automação.

A resposta das empresas à automação também pode variar. Algumas empresas podem investir pesadamente em tecnologias avançadas para manter a competitividade, enquanto outras podem adotar uma abordagem mais cautelosa, equilibrando o uso de automação com a preservação de empregos humanos. A estratégia adotada pode depender

de fatores como o tamanho da empresa, recursos disponíveis e a natureza do mercado em que operam.

Ademais, as políticas governamentais desempenham um papel crucial na mediação dos efeitos da automação. Políticas de apoio à requalificação, incentivos à inovação e regulamentações adequadas podem mitigar os impactos negativos e promover um ambiente de trabalho mais equilibrado. Arntz, Gregory e Zierahn (2016) enfatizam que a implementação de políticas adaptativas é essencial para lidar com as diferentes realidades econômicas e sociais das regiões.

Portanto, a automação não é uma solução única que se aplica uniformemente a todas as situações. Seus efeitos variam amplamente e dependem de uma combinação de fatores econômicos, sociais e políticos. Para maximizar os benefícios e minimizar os impactos negativos, é fundamental uma abordagem flexível e adaptativa, que leve em consideração as especificidades de cada contexto.

2.5 Ansiedade Tecnológica e Adaptação Social

A introdução de novas tecnologias e a crescente automação em diversos setores da economia frequentemente geram o que é conhecido como “ansiedade tecnológica”. Este fenômeno, explorado por Mokyr, Vickers e Ziebarth (2015), refere-se ao medo e à preocupação que trabalhadores e sociedades em geral sentem em relação ao potencial de substituição de empregos e à obsolescência de habilidades devido ao avanço tecnológico. A ansiedade tecnológica não é um fenômeno novo; ela acompanhou cada grande onda de inovação, desde a Revolução Industrial até os dias atuais.

Um dos principais componentes da ansiedade tecnológica é o medo da perda de emprego. Trabalhadores em funções que são facilmente automatizáveis, como tarefas repetitivas em linhas de montagem, estão particularmente suscetíveis a esse medo. Esse sentimento de insegurança pode levar a um aumento do estresse e da insatisfação no trabalho, afetando a saúde mental e o bem-estar dos empregados. A ansiedade tecnológica também pode dificultar a aceitação de novas tecnologias, criando resistência entre os trabalhadores e tornando a transição para a automação mais desafiadora para as empresas.

Contudo, a história mostra que, embora a automação e as inovações tecnológicas substituam determinadas funções, elas também criam novas oportunidades e transformam o mercado de trabalho de maneiras que muitas vezes não são inicialmente aparentes. Mokyr, Vickers e Ziebarth (2015) argumentam que as sociedades têm a capacidade de se adaptar às mudanças tecnológicas por meio da educação e da requalificação profissional. A chave para essa adaptação bem-sucedida está no investimento contínuo em educação e treinamento, permitindo que os trabalhadores adquiram novas habilidades que são complementares às tecnologias emergentes.

A adaptação social à automação também exige uma mudança na mentalidade das empresas e dos formuladores de políticas públicas. É necessário promover uma cultura de aprendizado contínuo e flexibilidade, onde a requalificação e o desenvolvimento profissional são vistos como partes integrantes da carreira de um trabalhador. Políticas de apoio, como programas de requalificação financiados pelo governo, incentivos fiscais para empresas que investem em treinamento de funcionários e parcerias entre setores público e privado, são essenciais para facilitar essa transição.

Adicionalmente, a comunicação aberta e transparente sobre as mudanças tecnológicas e seus impactos é crucial para reduzir a ansiedade tecnológica. Empresas e governos



devem se esforçar para manter os trabalhadores informados sobre as novas tecnologias, suas vantagens e os esforços sendo feitos para mitigar os impactos negativos. Isso ajuda a construir confiança e engajamento, facilitando uma transição mais suave para um ambiente de trabalho mais automatizado.

Por fim, a adaptação social à automação também envolve a criação de um ambiente de trabalho que valorize e aproveite as habilidades únicas dos seres humanos, como criatividade, empatia e tomada de decisão crítica. Enquanto a automação pode assumir tarefas rotineiras e repetitivas, os trabalhadores humanos podem se concentrar em atividades que requerem pensamento inovador e interações complexas, áreas onde as máquinas ainda não conseguem substituir completamente a contribuição humana.

Em suma, a ansiedade tecnológica é um desafio significativo na era da automação, mas pode ser mitigada através de educação, requalificação profissional, políticas de apoio e comunicação transparente. A adaptação social bem-sucedida à automação depende da capacidade das sociedades de abraçar a mudança e de equipar seus trabalhadores com as ferramentas necessárias para prosperar em um mercado de trabalho em constante evolução.

2.6 Indústrias do Futuro e Demandas Tecnológicas

A automação não se limita apenas à substituição de funções existentes; ela também impulsiona a criação de novas indústrias e demandas tecnológicas que moldarão o futuro do trabalho. Ross (2016) explora como a automação está influenciando as “indústrias do futuro”, sugerindo que a inovação tecnológica será uma força transformadora em setores emergentes, como biotecnologia, inteligência artificial e cibersegurança.

A biotecnologia, por exemplo, é um setor em rápido crescimento que se beneficia enormemente dos avanços em automação. Técnicas automatizadas estão sendo usadas para acelerar a pesquisa e o desenvolvimento de novos medicamentos, melhorar a precisão dos diagnósticos e otimizar a produção agrícola. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência, mas também expandem o potencial do que pode ser alcançado em termos de cuidados de saúde e sustentabilidade alimentar.

A inteligência artificial (IA) é outra área onde a automação está criando novas oportunidades. A IA permite a análise de grandes volumes de dados com uma velocidade e precisão que seriam impossíveis para os humanos. Isso está transformando setores como finanças, onde algoritmos de negociação automatizada podem analisar o mercado em tempo real, e saúde, onde sistemas de IA estão sendo usados para identificar padrões em exames médicos e prever doenças antes que se manifestem clinicamente.

No campo da cibersegurança, a automação desempenha um papel crítico na proteção de redes e sistemas contra ameaças cibernéticas. Ferramentas automatizadas são usadas para monitorar atividades suspeitas, responder rapidamente a incidentes de segurança e implementar atualizações de segurança de forma eficiente. A crescente dependência de tecnologia digital em todos os aspectos da vida moderna torna a cibersegurança um campo essencial, com uma demanda crescente por profissionais qualificados.

Além desses setores específicos, a automação também está impulsionando a demanda por habilidades que são complementares às tecnologias emergentes. Profissionais capazes de integrar e gerenciar sistemas automatizados, desenvolver algoritmos avançados e aplicar tecnologias emergentes de maneira inovadora são altamente valorizados. As instituições educacionais estão adaptando seus currículos para preparar a próxima geração

de trabalhadores para essas novas demandas, enfatizando habilidades técnicas, pensamento crítico e inovação.

Apesar de, a adaptação às novas tecnologias requer um enfoque proativo na requalificação da força de trabalho existente. À medida que as indústrias evoluem, os trabalhadores precisam adquirir novas competências para permanecerem competitivos no mercado de trabalho. Programas de requalificação e treinamento contínuo são essenciais para garantir que os trabalhadores possam transitar para novos setores e aproveitar as oportunidades oferecidas pelas indústrias do futuro.

Pois, a automação está moldando o panorama das indústrias do futuro, criando novas demandas tecnológicas e oportunidades de trabalho em setores emergentes. O desenvolvimento de habilidades complementares às tecnologias avançadas e a implementação de programas de requalificação são fundamentais para garantir que os trabalhadores possam se beneficiar plenamente das transformações tecnológicas.

3. CONCLUSÃO

A automação está se estabelecendo como uma força transformadora em diversas indústrias, promovendo ganhos substanciais em produtividade e eficiência. No entanto, seus impactos são variados e complexos, apresentando tanto oportunidades quanto desafios significativos. É evidente que a automação tem o potencial de substituir tarefas repetitivas e de baixa qualificação, ao mesmo tempo que cria novas oportunidades de emprego que exigem habilidades avançadas e criativas.

Os benefícios da automação são amplos, incluindo a capacidade de realizar tarefas com maior precisão e velocidade, reduzindo custos operacionais e aumentando a qualidade da produção. Adicionalmente, a automação permite a realocação de recursos humanos para funções mais estratégicas e inovadoras, potencializando a criatividade e a tomada de decisão nas empresas.

Por outro lado, a automação também levanta questões importantes sobre a desigualdade social e o deslocamento de trabalhadores. As empresas e governos precisam desenvolver políticas e estratégias eficazes para mitigar os riscos associados à automação, como falhas técnicas e ataques cibernéticos, além de promover programas de requalificação profissional para garantir que os trabalhadores possam se adaptar às novas demandas do mercado de trabalho.

O papel das políticas públicas é crucial para mediar os efeitos da automação, promovendo a inclusão, equidade e acesso a oportunidades de requalificação. A implementação de políticas adaptativas, que considerem as especificidades econômicas e sociais de cada região, é essencial para maximizar os benefícios da automação e minimizar seus impactos negativos.

Em última análise, a automação representa uma oportunidade significativa para o avanço tecnológico e econômico, desde que seja acompanhada de estratégias bem planejadas para lidar com seus desafios. O futuro do trabalho será moldado pela capacidade de adaptação de empresas, trabalhadores e governos às mudanças trazidas pela automação, garantindo que todos possam se beneficiar desse progresso.



REFERÊNCIAS

- ACEMOGLU, D., & RESTREPO, P. **Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets.** *Journal of Political Economy*, 2020. Disponível em: Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets | NBER Acesso em: 18 nov. 2024.
- ALIDADI, A. **Revolutionizing Manufacturing:** The Future of Industrial Automation. Cademix Institute of Technology, 2023. Disponível em: Revolutionizing Manufacturing: The Future of Industrial Automation Acesso em: 18 nov. 2024.
- ARNTZ, M., GREGORY, T., & ZIERAHN, U. **The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries.** OECD Publishing, 2016. Disponível em: The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries Acesso em: 18 nov. 2024.
- AUTOR, D. H., DORN, D., & HANSON, G. H. **The China Syndrome:** Local Labor Market Effects of Import Competition in the United States. *American Economic Review*, 2013. Disponível em: The China Syndrome: Local Labor Market Effects of Import Competition in ... Acesso em: 18 nov. 2024.
- BROWN, P., & KEEP, E. **Rethinking the Race between Education and Technology.** *Issues in Science and Technology*, 2018. Disponível em: Rethinking the Race Between Education Technology - JSTOR Acesso em: 18 nov. 2024.
- BRYNJOLFSSON, E., & MCAFEE, A. **The Second Machine Age:** Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. 2014. Disponível em: The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of ... Acesso em: 18 nov. 2024.
- BRYNJOLFSSON, E., ROCK, D., & SYVERSON, C. **Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics.** NBER Working Paper No. 24001, 2017. Disponível em: Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of ... Acesso em: 18 nov. 2024.
- CHUI, M., MANYIKA, J., & MIREMADI, M. **Where Machines Could Replace Humans—and Where They Can't (Yet).** *McKinsey Quarterly*, 2016. Disponível em: Where machines could replace humans-and where - ProQuest Acesso em: 18 nov. 2024.
- FORD, M. **Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future.** Basic Books, 2018. Disponível em: Rise of the robots : technology and the threat of a jobless future Acesso em: 18 nov. 2024.
- FREY, C. B., & OSBORNE, M. A. **The future of employment:** How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 2017. Disponível em: The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation ... Acesso em: 18 nov. 2024.
- GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing.** Pearson, 2021. Disponível em: Automation, Production Systems, and Computer-Integrated ... - Pearson Acesso em: 18 nov. 2024.
- MOKYR, J., VICKERS, C., & ZIEBARTH, N. L. **The History of Technological Anxiety and the Future of Economic Growth:** Is This Time Different? *Journal of Economic Perspectives*, 2015. Disponível em: The History of Technological Anxiety and the Future of Economic Growth ... Acesso em: 18 nov. 2024.
- ROSS, A. **The Industries of the Future.** Simon & Schuster, 2016. Disponível em: The Industries of the Future - Alec Ross - Google Books Acesso em: 18 nov. 2024.

Resumo

Este artigo aborda o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de medição de calor e fluidos, fundamentais para entender os processos industriais e melhorar a eficiência energética. O objetivo geral do estudo é analisar esses sistemas com ênfase na mecânica dos fluidos, destacando sua importância na medição precisa em diversos campos da engenharia. A pesquisa busca conceituar a mecânica dos fluidos e compreender os desafios relacionados à medição de parâmetros como pressão, vorticidade e transferência de calor, especialmente em fluxos não newtonianos e variáveis no tempo. A metodologia utilizada foi uma revisão de literatura, com enfoque qualitativo e descritivo. A revisão incluiu a análise de artigos científicos, livros e monografias, consultados em plataformas acadêmicas como Google Acadêmico, *Scielo* e *Lilacs*. Essa abordagem permitiu uma síntese de informações pré-existentes e a formulação de conclusões sobre o tema proposto. Os resultados da pesquisa mostram que os sistemas de medição são essenciais para melhorar a precisão e a gestão dos processos que envolvem fluidos e transferência de calor. Além disso, o estudo destaca os desafios de medição em fenômenos complexos, sugerindo a necessidade de desenvolvimento contínuo de técnicas avançadas para atender às demandas da indústria moderna.

Palavras-chave: Sistemas de medição. Fluido. Calor. Vazão

Abstract

This article addresses the development and improvement of heat and fluid measurement systems, fundamental to understanding industrial processes and improving energy efficiency. The general objective of the study is to analyze these systems with emphasis on fluid mechanics, highlighting their importance in precise measurement in various fields of engineering. Research seeks to conceptualize fluid mechanics and understand the challenges related to parameter measurement such as pressure, vorticity and heat transfer, especially in non-Newtonian and time-variable flows. The methodology used was a literature review, with qualitative and descriptive approach. The review included the analysis of scientific articles, books and monographs, consulted on academic platforms such as Google Academic, *Scielo* and *Lilacs*. This approach allowed a synthesis of pre-existing information and the formulation of conclusions on the proposed theme. Research results show that measurement systems are essential for improving the accuracy and management of processes involving fluids and heat transfer. In addition, the study highlights the challenges of measurement in complex phenomena, suggesting the need for continuous development of advanced techniques to meet the demands of modern industry.

Keywords: Measurement systems. Fluid. Heat. Flow

1. INTRODUÇÃO

O interesse no desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de medição de calor e fluidos tem crescido consideravelmente. Esses sistemas desempenham um papel crucial em diversos campos da engenharia mecânica. A capacidade de medir com precisão e eficiência o calor e o fluxo de fluidos é fundamental para otimizar processos industriais, melhorar a eficiência energética e compreender fenômenos físicos complexos (Bortoli, 2016).

As técnicas de visualização do fluxo fornecem uma ferramenta valiosa para criar uma imagem geral de um campo de fluxo e identificar suas características principais antes de prosseguir para medições quantitativas mais detalhadas. Certas medidas pontuais são particularmente desafiadoras, como em fluxos separados, fluidos não newtonianos, fluxos rotacionais e aerossóis nucleares. Medir pressão, tensão de cisalhamento, vorticidade e coeficiente de transferência de calor também apresenta dificuldades, especialmente em fluxos que variam com o tempo (Brunetti, 2018).

A mecânica dos fluidos é um campo empírico, que muitas vezes se baseia em fórmulas derivadas de resultados experimentais observados. No entanto, é importante reconhecer que há desafios inerentes à modelagem matemática de fenômenos fluidos, levando muitas vezes ao uso extensivo de “coeficientes” para explicar efeitos que são difíceis de serem totalmente representados por equações (Brunetti, 2018).

Os sistemas de medição de calor e fluxo desempenham um papel crucial em uma ampla gama de aplicações industriais, desde a otimização de processos de produção até o entendimento de tecnologias energéticas. No entanto, a precisão e eficácia desses sistemas podem ser comprometidas devido à complexidade dos fenômenos fluidos e às limitações dos métodos de medição existentes. Diante disso perguntou-se: Qual a importância de se entender sistemas de medição em calor e fluidos?

O objetivo geral do artigo é estudar os sistemas de medição em calor e fluidos, com ênfase na compreensão e aplicação dos conceitos da mecânica dos fluidos. Para atingir esse objetivo, pretende-se conceituar a mecânica dos fluidos e compreender a importância dos sistemas de medição tanto em calor quanto em fluidos. A análise desses sistemas é essencial para aprimorar a eficiência e a precisão nas aplicações práticas, possibilitando uma melhor gestão e controle de processos envolvendo fluidos e transferência de calor.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia empregada foi uma abordagem qualitativa descritiva, caracterizada como revisão de literatura. Este método possibilitou a síntese de informações já existentes e a formulação de conclusões com base no tema proposto. A revisão foi conduzida por meio da análise de artigos, livros e monografias, acessíveis em plataformas acadêmicas como Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e nos bancos de teses e dissertações de universidades brasileiras.

Para a coleta de dados, foi realizada uma leitura analítica das publicações selecionadas, com o objetivo de que as teorias e conceitos abordados contribuíssem para a resolução do problema de pesquisa. O período de busca compreendeu os últimos 10 anos, permitindo a inclusão de informações atualizadas. Além disso, foram consultados livros de



autores renomados na área de calor e fluidos, como Maliska (2017), Brunetti (2018) e Bortoli (2016), para fortalecer a análise e a fundamentação teórica do estudo. As palavras-chave utilizadas na pesquisa foram: Sistemas, Medição, Calor e Fluidos.

Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos para definir quais fontes seriam consideradas relevantes para a pesquisa. Foram incluídos artigos e publicações dos últimos 10 anos, em português e inglês, que abordassem diretamente a medição de calor e fluidos e fossem de tipo acadêmico, como periódicos revisados por pares, livros e teses. Foram excluídas fontes anteriores a 2013, publicações em idiomas distintos do português e inglês, materiais não acadêmicos e documentos que não contribuíssem substancialmente para o tema da pesquisa.

2.2 Resultado e Discussão

De acordo com Bortoli (2016), a transferência de calor em meios porosos tem atraído crescente interesse acadêmico e industrial. Isso envolve a utilização de materiais como espumas metálicas de células abertas, feltros metálicos de fibra sinterizada e estruturas metálicas treliçadas, conhecidos por sua elevada condutividade térmica. Esses materiais oferecem uma ampla gama de possibilidades de aplicação em diversas áreas da engenharia devido às suas propriedades exclusivas.

Segundo Bortoli (2016), esses meios porosos são especialmente valiosos para otimizar o transporte de calor em diferentes sistemas, já que sua estrutura permite uma distribuição eficiente da temperatura, sendo essenciais em aplicações que exigem controle térmico preciso.

Conforme Brunetti (2018), esses materiais desempenham um papel fundamental em sistemas de armazenamento térmico avançados, onde a capacidade de absorver e liberar calor de forma controlada contribui para a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas energéticos.

O estudo da transferência de calor em meios porosos é crucial para diversas aplicações científicas e industriais, e é abordado por meio de dois modelos principais: o modelo de equilíbrio térmico local (LTE) e o modelo de não equilíbrio térmico local (LTNE). O LTE é utilizado quando as diferenças de temperatura entre as fases fluida e sólida são pequenas, enquanto o LTNE é aplicável em situações com grandes discrepâncias térmicas (Çengel; Cimbala, 2017).

Pesquisas têm focado extensivamente na aplicação do modelo LTE em meios porosos de baixa condutividade. Por exemplo, Maliska (2017) estudou o escoamento convectivo em um canal com matriz porosa parcialmente preenchida, utilizando o modelo Brinkman-LTE para examinar os efeitos de diferentes parâmetros na distribuição de calor.

Em outra abordagem, o modelo *Forchheimer-LTE* foi aplicado a um canal de meio poroso, resultando em um aumento significativo na taxa de transferência de calor, especialmente em meios com alta média permeabilidade (Potter; Scott, 2017). A influência de fatores como condutividade térmica, permeabilidade e espessura do material poroso na transferência de calor em um duto anular, empregando o modelo *Brinkman-LTE*.

Nanofluidos, conhecidos por suas elevadas taxas de condução térmica, têm sido objeto de numerosos estudos voltados para melhorar seu desempenho em diversas indústrias. Estudos avançados examinam o comportamento do fluxo convectivo em canais de placas paralelas com meios altamente porosos, fornecendo insights valiosos sobre a transferência de calor nesses ambientes (Potter; Scott, 2017).

Modelos como LTE, LTNE, Darcy e *Brinkman* são aplicados para uma melhor compreensão da dinâmica térmica. Análises detalhadas também exploram perfis de temperatura em diferentes concentrações de nanopartículas, comparando abordagens de transferência de calor com fluxo constante na parede, otimizando assim a eficiência e a aplicabilidade dos nanofluidos em diversas indústrias (Bortoli, 2016).

2.2.1 Sistemas de Medição de Vazão

Os sistemas de medição de vazão são essenciais para monitorar e controlar o fluxo de líquidos e gases em processos industriais. Eles utilizam diferentes tecnologias, como medidores de pressão diferencial, ultrassônicos, e rotâmetros, cada um adequado a condições específicas de fluido e de processo (Sousa et al., 2023).

Segundo Martins (2024), a precisão na medição de vazão é crucial para garantir a eficiência operacional, segurança e conformidade com regulamentações. Esses sistemas também ajudam na otimização de recursos, como energia e matéria-prima, contribuindo para a sustentabilidade e redução de custos. A seguir temos os tipos de medidores de vazão.

	Sistema	Medidor
Medidores de vazão volumétrica	Pressão diferencial (deprimogênio) - Medidores conectados a tubo U ou a elementos de redução ou diafragma	Placa Orifício
		Tubo Venturi
		Tubo Pitot
		Tubo Annubar
	Área variável	Rotâmetros
	Velocidade	Turbina
		Ultrassônico
	Tensão induzida	Magnético
	Deslocamento (positivo)	Roda oval, helicoidal
Medidores de vazão mássica	Redemoinho (Vortex)	Medidor de frequência
	Força	Placas de impacto
	Térmico	Diferença de temperatura em sondas de resistência
		Coriolis
		Tubo em vibração

Tabela 1. Tipos de Medidores de Vazão

Fonte: Adaptado Silva (2023).

A medição de vazão por pressão diferencial é uma técnica amplamente utilizada que se baseia na criação de uma diferença de pressão em um ponto do fluxo, geralmente causada por um dispositivo chamado deprimogênio. Dispositivos comuns incluem placas de orifício, bocais e tubos Venturi, que geram uma queda de pressão proporcional à vazão do fluido (Silva, 2023).



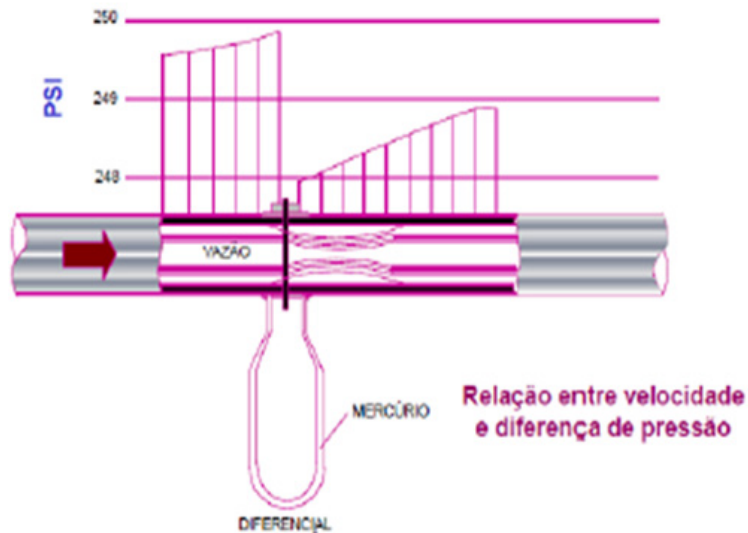


Figura 2. Tipos de Medidores de Vazão

Fonte: Bertoli (2016).

O medidor magnético de vazão é um dispositivo eficiente na medição de fluxos em sistemas hidráulicos, caracterizado por uma perda de carga mínima. Essa eficiência é resultado de seu design que não possui obstruções internas, fazendo com que a perda de carga seja equivalente à de um trecho reto de tubulação. Com diâmetros que variam de 2,5 mm até 2600 mm, esses medidores oferecem versatilidade e precisão, adaptando-se a diferentes necessidades de medição sem comprometer o fluxo do fluido (Pimenta; Luna, 2023).

De acordo Lima (2023), os deprimogênios são eficientes em uma variedade de aplicações industriais devido à sua simplicidade e robustez. A leitura da diferença de pressão permite calcular a vazão com precisão, sendo essencial para processos que exigem controle rigoroso do fluxo, como em sistemas de produção e distribuição de gases e líquidos.

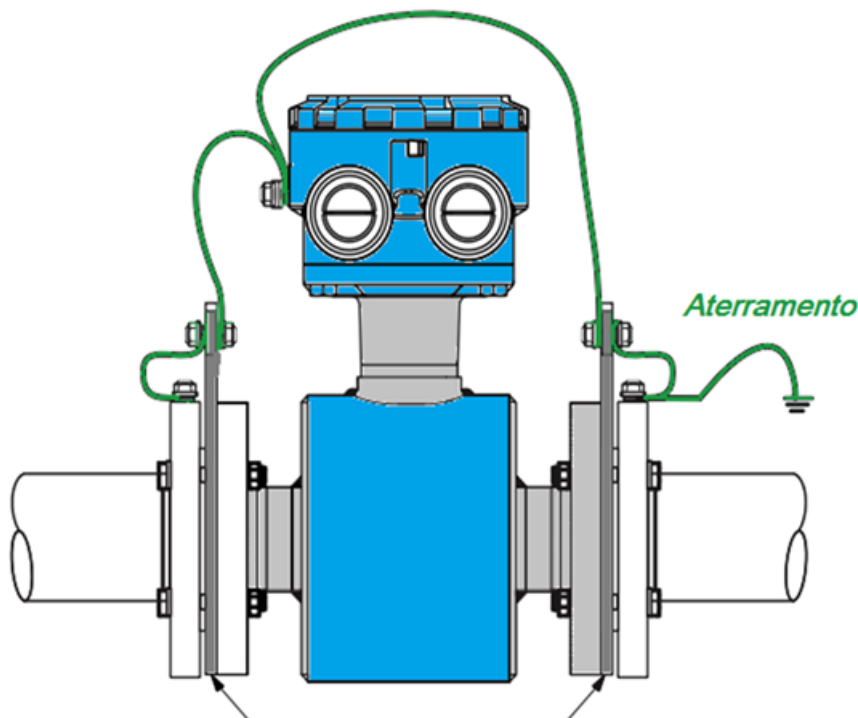


Figura 3. Medidor magnético de vazão

Fonte: Silva (2023).

Os medidores magnéticos de vazão funcionam baseados no princípio da indução eletromagnética, onde o movimento de um fluido condutor através de um campo magnético gerado externamente induz um potencial elétrico. Essa tecnologia é especialmente eficaz para medir a vazão de fluidos condutivos, garantindo precisão e confiabilidade nos resultados. Por serem medidores de passagem livre, não há partes móveis, o que contribui para a durabilidade e baixa manutenção do equipamento (Martins, 2024).

2.2.2 Medição de Temperatura em Processos Industriais

A medição de temperatura em processos industriais é uma prática essencial para garantir a qualidade e a segurança das operações. Em diversas indústrias, como a química, petroquímica, alimentícia e farmacêutica, o controle preciso da temperatura é fundamental para a eficiência dos processos e para a conformidade com normas de segurança (Sousa, 2023).

De acordo com Bertoli (2016), dispositivos como termopares, termoresistências (RTDs) e pirômetros são amplamente utilizados para monitorar e ajustar a temperatura em tempo real, prevenindo desvios que possam comprometer a qualidade do produto final ou a segurança do processo.

A medição de temperatura em caldeiras utilizando termopares é uma prática comum em ambientes industriais devido à sua precisão e confiabilidade. O termopar é um sensor que consiste em dois metais diferentes unidos em uma extremidade, formando uma junção que, quando exposta ao calor, gera uma tensão elétrica proporcional à temperatura (Lima, 2023).

O principal objetivo de medir e controlar as diversas variáveis físicas em processos industriais é garantir a produção de produtos de alta qualidade, com eficiência e segurança, além de manter os custos alinhados às demandas do mercado consumidor (Garcia et al., 2018).

De acordo com Garcia et al. (2018), os termopares são amplamente utilizados na indústria para medição de temperatura devido à sua ampla faixa de operação, que abrange de -200°C a aproximadamente 2300°C. Eles oferecem precisão e repetibilidade aceitável, sendo também mais econômicos em comparação com outros tipos de sensores de temperatura.

Requisito	Orifício	Deslocamento positivo	Vortex	Eletromagnético	Acústico	Coriolis
Exatidão	±2~4% do spam total	±0.2~0.5 % da taxa	±1.0% Da taxa	±0.5% da taxa	±1~5% do Spam total	±0.5% da taxa
Perda Pressão	médio	alta	médio	nenhum	nenhum	baixo
Custo Inicial	baixo	médio	alto	alto	alto	muito alto
Custo manutenção	alto	médio	Médio	baixo	baixo	baixo
Aplicação	Limpeza, liq sujo; alguns chorume	Limpeza liq viscoso	Liquido limpo, sujo;	Liq. Limpo, viscoso, sujo condutor. e chorume	Liq. sujo, viscoso e chorume	liq. limpo, sujo, viscoso e alguns chorume
tamanho do tubo à montante	10~30	nenhum	10 a 20	5	5 a 30	nenhum
Viscosidade efeito	alto	alto	médio	nenhum	nenhum	nenhum
Rangeabilidade	4 a 1	10 a 1	10 a 1	40 a 1	20 a 1	10 a 1

Tabela 2. Comparação De Medidores De Vazão
Fonte: Arruda (2023).



Em caldeiras, onde o controle rigoroso da temperatura é crucial para a eficiência e segurança do processo, os termopares são amplamente utilizados devido à sua capacidade de operar em altas temperaturas e sua resposta rápida às variações térmicas. Eles são posicionados em pontos estratégicos dentro da caldeira para monitorar a temperatura dos gases de combustão, das superfícies de troca de calor e do vapor gerado, garantindo que o equipamento opere dentro dos parâmetros seguros e eficientes (Pimenta; Luna, 2023).

No contexto industrial atual, é raro encontrar processos que não envolvam algum nível de automação ou monitoramento. A intensa concorrência no mercado exige uma produção ágil, que maximize a eficiência e minimize o desperdício de recursos. Por isso, a automação e o monitoramento contínuo dos processos são essenciais para indústrias que buscam alta produtividade e competitividade (Martins, 2024).

Conforme Silva (2023), as combinações de fios devem gerar uma f.e.m. suficientemente perceptível para ser detectada por equipamentos de medição padrão com a mudança de temperatura. Ao longo do tempo, foram desenvolvidas várias combinações de ligas metálicas, que variam desde opções comuns para uso industrial até outras mais sofisticadas, destinadas a aplicações especiais ou laboratoriais.

Essas combinações são projetadas para oferecer alta potência termoelétrica, além de outras características desejáveis, como a homogeneidade dos fios e resistência à corrosão na faixa de temperatura ideal de trabalho. Cada tipo de termopar possui uma faixa específica de operação, que deve ser respeitada para garantir sua durabilidade (Pimenta; Luna, 2023).

De forma geral, os termopares podem ser classificados em três categorias principais: básicos, nobres e especiais. Os termopares básicos incluem os tipos T, J, E e K; os nobres abrangem os tipos S, R e B; e os especiais englobam combinações como Tungstênio-Rênio, Irídio 40% Ródio-Irídio, Platina 40% Ródio-Platina 20% Ródio, Ouro-Ferro *Chromel*, e *Nicrosil-Nisil* (Arruda, 2023).

De acordo com os autores Young, Munson e Okiishi (2015, em muitas aplicações industriais, o sensor do termopar não está localizado diretamente junto ao dispositivo de medição, sendo necessário o uso de fios de compensação e extensão para garantir a precisão da medição a longas distâncias.

No campo da medição de fluxo, uma vasta gama de métodos tem sido desenvolvida e aplicada em diferentes indústrias, incluindo a de reatores nucleares. De abordagens tradicionais a técnicas mais avançadas, o objetivo central é aumentar a precisão das medições em variadas condições de processo (Young; Munson; Okiishi, 2015). Esses esforços refletem a importância de uma compreensão detalhada dos fenômenos de transporte e transferência de calor em fluidos, além da necessidade de técnicas precisas para monitorar e otimizar processos industriais complexos.

A medição de queda de pressão através de uma restrição no caminho do fluxo é uma técnica amplamente utilizada na indústria de processos para determinar o fluxo de fluidos em reatores. Essa abordagem se baseia no princípio de que a diferença de pressão entre pontos antes e depois da restrição está diretamente relacionada à taxa de fluxo do fluido (Sousa, 2023).

De acordo com Garcia *et al.* (2018), além da técnica de medição por queda de pressão, os medidores de fluxo ultrassônicos representam outra abordagem eficaz para determinar o fluxo de fluidos em sistemas industriais. Esses medidores utilizam transdutores de som posicionados em um ângulo em relação ao tubo de fluxo.

Conforme Silva (2023), um dos transdutores emite pulsos ultrassônicos na direção do

fluxo, enquanto o outro os detecta após passarem pelo fluido. A diferença de tempo entre a emissão e a detecção dos pulsos permite calcular a velocidade do fluido e, consequentemente, sua taxa de fluxo.

Ambas as técnicas de medição descritas apresentam vantagens e são aplicáveis a diferentes situações industriais. A medição por queda de pressão é robusta e amplamente adotada, especialmente em cenários onde a simplicidade e a confiabilidade são essenciais (Sousa, 2023).

Em contrapartida, os medidores de fluxo ultrassônicos oferecem uma abordagem não intrusiva e altamente precisa para medir o fluxo em uma variedade de condições de processo, sendo ideais para aplicações onde a precisão é crucial (Young; Munson; Okiishi, 2015).

A escolha entre essas técnicas de medição deve considerar as necessidades específicas do processo industrial, levando em conta fatores como a precisão requerida, as condições de operação e a viabilidade econômica. Ambas as abordagens são ferramentas valiosas para monitorar e controlar o fluxo de fluidos em sistemas industriais, contribuindo para a eficiência e segurança dos processos (Arruda, 2023).

O estudo realizado por Gracia *et al.* (2018) enfatiza a complexidade envolvida na medição de fluidos, especialmente durante transições entre diferentes estados, como ao sair de um poço e entrar em um queimador. Esses autores ressaltam que é essencial medir propriedades do fluido, como velocidade, taxa de fluxo de volume, taxa de fluxo de massa e taxa de fluxo de energia, para compreender e controlar os processos envolvidos.

No entanto, conforme apontado por Lima (2023), a medição direta dessas propriedades muitas vezes não é viável. Em vez disso, os engenheiros recorrem a métodos indiretos, como a inferência e observação de parâmetros mensuráveis, como mudanças na resistência elétrica ou o desvio de um tubo em resposta a alterações de pressão. Embora esses métodos não forneçam medições diretas, eles permitem estimativas confiáveis das propriedades do fluxo.

Por exemplo, Gracia *et al.* (2018) explicam que, com base em valores conhecidos de temperatura, pressão e diâmetro do orifício, é possível inferir a velocidade do fluido. De forma semelhante, a densidade do fluido, o coeficiente de atrito rotativo e outras variáveis permitem estimar a taxa de transferência de momento, que, por sua vez, pode ser usada para calcular a velocidade do fluido.

Entretanto, é crucial reconhecer, conforme discutido por Baniassadi, Sailor e Bryan (2019), que a estabilização dos dispositivos de medição é essencial para garantir a precisão das medições. Durante períodos de transição, as suposições subjacentes podem não se aplicar, levando a estimativas imprecisas ou incorretas das propriedades do fluxo.

A medição de fluidos é uma interação complexa entre observação direta, inferência de dados e estabilização dos dispositivos de medição. Combinando teoria, observação e prática, os engenheiros podem obter uma compreensão precisa e confiável do comportamento dos fluidos em uma variedade de contextos industriais (Baniassadi; Sailor; Bryan, 2019).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo conseguiu apresentar uma análise abrangente dos sistemas de medição de calor e fluidos, destacando sua importância para a otimização de processos industriais e

a melhoria da eficiência energética. Além disso, foi possível demonstrar como as técnicas de visualização do fluxo e a compreensão dos fenômenos da mecânica dos fluidos contribuem para avanços nas áreas de engenharia e controle de processos.

Embora os resultados tenham sido satisfatórios, o estudo enfrentou algumas limitações, especialmente no que se refere à dificuldade de mensurar variáveis específicas em fluxos complexos, como vorticidade e pressão em fluidos não newtonianos. Essas limitações indicam a necessidade de novas pesquisas que desenvolvam técnicas mais precisas e acessíveis para medições pontuais em condições adversas, como fluxos separados e aerossóis nucleares.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o aprofundamento na integração de modelos matemáticos mais precisos com medições experimentais, de modo a reduzir a dependência de “coeficientes empíricos”. Também seria valioso explorar tecnologias emergentes de visualização e medição que possam aprimorar a precisão e eficiência no controle de fluidos e calor em sistemas industriais. Portanto, o estudo contribui para o campo da mecânica dos fluidos e sistemas de medição, abrindo portas para pesquisas futuras que busquem superar as limitações identificadas e expandir o conhecimento em áreas críticas da engenharia.

Referências

- ARRUDA, Vitória Gabriela Borges. **Medidores de vazão**: aplicações para um laboratório didático de física. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) em Física - Licenciatura, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), 2023.
- BANIASSADI, C. R. SAILOR. A. C. BRYAN. T. A. O. **Estudo experimental Características do escoamento turbulento nas primeiras de banco de tubos**. 133 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre RS, (2019).
- BORTOLI, A. L. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2016.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos. 2 ed.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2018. ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Mc Graw-Hill, 2017.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Mc Graw-Hill, 2017.
- GRACIA et al., L. C. P.; **Análise teórico-experimental do coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por jato-compressão**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, (2018).
- LIMA, Adriedson Augusto. **Melhoria do sistema de preparação do coletor para flotação de apatita através de medidores de vazão**. 2023. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023.
- MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2 ed. LTC: Rio de Janeiro, 2017.
- MARTINS, André Athaydes. **Proposta de bancada didática para instrumentação e controle de nível e vazão**. 2024.
- PIMENTA, Davi Medeiros; LUNA, Bruno Emmanuel De Oliveira Barros. **Análise temporal de calibrações de medidores de vazão do tipo deslocamento positivo para previsibilidade de falhas**. 2023.
- POTTER, M.C.; SCOTT, E.P. **Ciências Térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor**. Thomson, 2017.
- SILVA, Welton Celestino da. **Avaliação da efetividade entre um trocador de calor de placa com um trocador de calor aletado no resfriamento de óleo de um sistema de separação magnética**. 2023. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro

Preto, 2023.

SOUSA, Caroline Costa. **Análise comparativa do uso de medidores de vazão de gás para transferência de custódia**. 2023. 90 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Petróleo e Gás) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2023.

YOUNG, Donald F.; MUNSON, B. R.; OKIISHI, T. H. **Uma introdução concisa à mecânica dos fluidos**. Edgard Blucher: São Paulo, 2015.



Resumo

A Manutenção Preventiva de Caldeiras é um processo de suma importância para promover a eficiência e a segurança operacional dos sistemas de geração de vapor, uma vez que com a necessidade da utilização constante de novas tecnologias, há, também, a necessidade da implementação de um plano coordenado de manutenções. No qual pode ser definido como sendo um conjunto de ações sistemáticas programadas para prevenir falhas para, assim, garantir o funcionamento eficiente deste sistema energético, que envolve inspeções regulares, limpezas, ajustes e até substituições de componentes que possam comprometer o funcionamento pleno. Sendo assim, tem-se como objetivo principal reunir abordagens que apontem as vantagens associadas à prática da realização de manutenções preventivas em caldeiras, analisando como esse fato planejado pode impactar o desempenho e vida útil dos equipamentos. Para isso foi realizada uma pesquisa qualitativa, com a coleta de dados provenientes de artigos acadêmicos publicados. Portanto, as instruções demonstram que a adoção de práticas de manutenção preventiva não apenas garante a operação contínua e segura dos sistemas de caldeiras, mas também proporciona vantagens econômicas substanciais às empresas.

Palavras-chave: Gestão da Manutenção, Máquinas Industriais, Normas Regulamentadoras.

Abstract

Boiler Preventive Maintenance is an extremely important process to promote the efficiency and operational safety of steam generation systems, since with the need for constant use of new technologies, there is also the need to implement a plan maintenance coordinator. Which can be defined as a set of systematic actions programmed to prevent failures and thus guarantee the efficient functioning of this energy system, which involves regular inspections, cleaning, adjustments and even replacements of components that could compromise full functioning. Therefore, the main objective is to bring together approaches that highlight the advantages associated with the practice of carrying out preventive maintenance on boilers, analyzing how this planned fact can impact the performance and useful life of the equipment. For this, qualitative research was carried out, collecting data from published academic articles. Therefore, the instructions demonstrate that adopting preventative maintenance practices not only ensures the continuous and safe operation of boiler systems, but also provides substantial economic advantages to companies.

Keywords: Maintenance Management, Industrial Machines, Regulatory Standards.



1. INTRODUÇÃO

Para que haja uma melhor compreensão acerca dos benefícios associados à manutenção preventiva em caldeiras, é necessário rememorar que ao longo da história, os seres humanos têm buscado diferentes formas de energia com o intuito de aprimorar a qualidade da sua existência. Dessa forma, buscavam materiais disponíveis no seu meio, como a utilização de madeiras e restos vegetais para produção de fogo e vapor. Assim, com a evolução industrial e com a necessidade de produção em larga escala de energia, foi possível observar uma melhoria das técnicas, logo, os mecanismos arcaicos utilizados nos primórdios foram sendo substituídos por máquinas mais avançadas e eficientes, como é o caso da utilização de caldeiras, por exemplo.

Nesse contexto, as caldeiras – dispositivos utilizados na geração de vapor a partir da aplicação de calor em um fluido, como a água – emergiram como componentes essenciais, capazes de fornecer vapor para impulsionar motores e uma variedade de práticas industriais. Dessa maneira, essa necessidade de produção destacou a importância não apenas da eficiência operacional desse equipamento, mas também da manutenção preventiva adequada para garantir segurança, desempenho e confiabilidade. Logo, a realização de manutenções preventivas faz-se de suma importância quando atrelada ao contexto em questão.

Assim sendo, a manutenção preventiva é uma prática fundamental em diversos setores da indústria, a tese é justificada pelo fato de as manutenções preventivas serem cruciais nos setores que lidam com equipamentos de alta complexibilidade e riscos, como as caldeiras. Entretanto, uma manutenção inadequada ou a não realização de manutenções periodicamente podem resultar em graves acidentes, danos materiais e interrupção na produção. Visto isso, ao compreender a relevância das caldeiras em diversas indústrias e a necessidade de garantir sua operação segura e eficiente, surge o questionamento que norteará este estudo: há uma relação direta entre a implementação da manutenção preventiva de caldeiras e eficiência energética desses equipamentos?

Dessa forma, teve-se como objetivo geral, através das inflexões desenvolvidas durante o projeto de pesquisa a realização de uma revisão da incorporação dos diversos elementos que compõem o processo de manutenção de caldeiras em modelos analíticos. Para tanto, foi realizado um estudo detalhado acerca dos benefícios da realização de manutenções preventivas em sistemas industriais. Outrossim, empreendeu-se como objetivos específicos a realização de um estudo detalhado sobre os benefícios da ocorrência de manutenções preventivas em sistemas industriais, em comparação com as manutenções corretivas, além de investigar a influência das manutenções preventivas na confiabilidade e na vida útil dos equipamentos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

No intuito de analisar a fundo o tema foi conduzida uma revisão bibliográfica na qual envolve interesses universais e visa gerar novos conhecimentos para o tema em questão. Quanto ao objetivo foi usado o exploratório-descritivo que se caracteriza em proporcionar mais familiaridade com o problema abordado, tornando-o mais claro, possibilitando assim o delineamento além de expor as características do fenômeno e também manter uma co-

leta padronizada de dados.

O protocolo de revisão adotado foram os periódicos buscados em diversas bases de dados como SCIELO, Periódico CAPES e Repositórios Institucionais sendo selecionados por meio de recorte temporal (2014-2024) utilizando-se descritores específicos como “Manutenção Preventiva”, “Caldeiras”, “Gestão da Manutenção”, “Máquinas Industriais” e “Normas Regulamentadoras”. Os trabalhos escolhidos abordaram as perspectivas essenciais para a temática em discussão.

2.2 Resultados e Discussão

A implementação de um plano de manutenção preventiva em caldeiras mostrou resultados satisfatórios em relação à manutenção corretiva, uma vez que a manutenção corretiva é realizada apenas quando há falhas ou avarias nos processos, sendo, na maior parte das vezes, mais custosas e arriscadas (Arruda, 2019).

Dessa forma, a escolha entre essas duas estratégias de realização de manutenções tem impactos significativos na rotina industrial. A seguir, a Tabela 1 apresenta um comparativo entre as vantagens e desvantagens da manutenção preventiva em relação à manutenção corretiva.

Aspectos analisados	Manutenção Preventiva	Manutenção Corretiva
Custos	Diminuídos a longo prazo, visto que falhas graves e paradas inesperadas são evitadas (Botelho, 2015).	Elevados a longo prazo, uma vez que há reparos emergenciais e substituição de componentes danificados (Soares, 2022).
Vida útil	Prolongada, pois há menores desgastes dos componentes (Baggio, 2018).	Reduzida, devido ao desgaste dos equipamentos pela falta de manutenções regulares (Silva, 2015).
Segurança	Aumentada, uma vez que potenciais problemas são identificados e solucionados antes de causarem acidentes (Begas, 2024).	Reduzida, uma vez que pode haver a ocorrência de falhas inesperadas (Nascimento, 2017).
Impactos ambientais	Menor, com redução de desperdícios (Arruda, 2019).	Maior, devido ao descarte inadequado (Brasil, 2018).
Eficiência operacional	Melhorada, visto que os componentes funcionam em ótimas condições (Nascimento e Souza, 2017).	Comprometida, uma vez que há uma queda no desempenho (Arruda, 2019).

Tabela 1. Comparação entre Manutenção Preventiva e Manutenção Corretiva
Fonte: Autor (2024)

De acordo com a tabela comparativa entre as duas vias de manutenções estudadas, é possível notar que a ocorrência de relações positivas se dá, preferencialmente, pela Manutenção Preventiva, sendo capaz de proporcionar diversos benefícios para o gerenciamento de caldeiras, como apontado por Nascimento e Souza (2017), que evidenciam uma elevada eficiência operacional, devido ao bom funcionamento de todas as partes do sistema.

Outrossim, Begas (2024) também reforça a maior confiabilidade nas Manutenções Preventivas, visto que a segurança é aumentada já que potenciais problemas são solucionados antes que comprometam o pleno funcionamento das Caldeiras. Em contraste, tem-se Soares (2022) destacando elevados custos relacionados às Manutenções Corretivas, enquanto Arruda (2019) enfatiza a menor confiabilidade desse tipo de manutenção, tendo como base a queda no desempenho operacional desses sistemas.

Portanto, é notório que a prática de manutenções acumula vantagens significativas tanto para os equipamentos, quanto para as empresas. Logo, a implementação de um plano preventivo mostra ser uma estratégia mais eficaz e sustentável a longo prazo, o que contribui com integridade dos equipamentos e continuidade das operações industriais.

2.2.3 Primórdios da Produção Energética

Após analisar as vantagens da manutenção preventiva em caldeiras, é essencial contextualizar essa prática dentro da evolução histórica do uso de energia. Assim, durante o período paleolítico superior, os seres humanos reconheceram a necessidade de luz artificial e encontraram uma solução que envolvia a queima de galhos e gravetos de árvores, liberando uma resina que prolongava a chama. Essa prática não apenas atendia às necessidades noturnas, como também representava um avanço tecnológico crucial na utilização de recursos naturais para preparação de alimentos e aquecimento. (Farias, 2011).

À medida que as civilizações antigas começaram a florescer por volta de 4000 a.C., o entendimento e a exploração das fontes de energia se expandiram. O vento, por exemplo, emergiu como um valioso recurso energético, sendo utilizado de forma pioneira no antigo Império Romano para impulsionar diversas atividades humanas, deixando um legado duradouro no desenvolvimento das sociedades (Hémery; Bebier; Deléage, 1993).

Na Idade Média, avanços matemáticos impulsionaram o desenvolvimento de máquinas mecânicas complexas, resultando nos primeiros esboços das máquinas a vapor. Em 1698, o Engenheiro Militar inglês Thomas Savery concretizou essa ideia, marcando o início de uma era revolucionária. Sua máquina a vapor pioneira operou por cerca de 75 anos, até que James Watt desenvolveu cilindros que aprimoraram significativamente esse equipamento. (Farias, 2011).

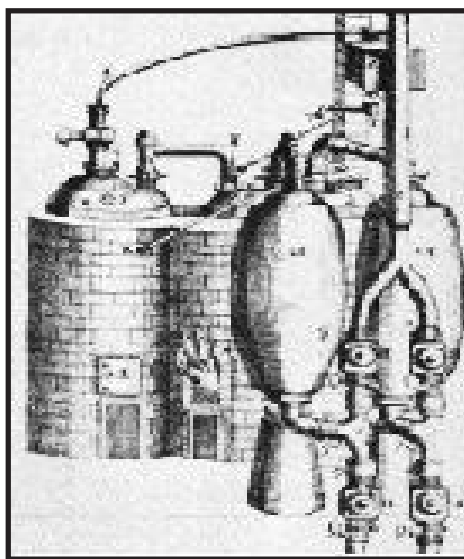


Figura 01. Primeira Máquina a Vapor, desenvolvida por Thomas Severy

Fonte: Leila Silveira, 2003. Repositório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Com o advento da Revolução Industrial, uma nova era na história da humanidade teve início, marcada pela ampla utilização de recursos energéticos provenientes de combustíveis fósseis. Nesse cenário, o carvão mineral emergiu como o principal protagonista, sendo empregado de forma pioneira na máquina revolucionária desenvolvida por James Watt na produção de vapor, um marco fundamental na história da engenharia e da industrialização (Farias, 2011).

Durante as décadas de 1940 a 1960, as usinas nucleares emergiram como uma fonte controversa de energia, em meio a uma busca intensa por alternativas devido ao aumento da demanda por eletricidade e ao desejo de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. Com sua capacidade de gerar grandes quantidades de eletricidade de forma relativamente limpa e eficiente, foram vistas como uma solução promissora para atender às crescentes necessidades energéticas das nações industrializadas (Hémery; Bebie; Deléage, 1993).

Além das preocupações com segurança, as usinas nucleares também geraram controvérsias devido ao problema da gestão de resíduos nucleares. O armazenamento seguro e de longo prazo dos resíduos radioativos produzidos pelas usinas nucleares representava um desafio técnico e político significativo, com poucas soluções viáveis sendo identificadas. O dilema dos resíduos nucleares alimentou o debate sobre a viabilidade e a sustentabilidade da energia nuclear como uma fonte de energia de longo prazo (Farias, 2011).

2.2.4 Geração de Vapor Por Meio de Caldeiras

As caldeiras são cruciais na indústria, gerando energia a partir do vapor produzido por uma fonte termicamente aquecida. Seu funcionamento complexo envolve a integração de vários equipamentos para otimizar a utilização da energia térmica, levando em conta condições específicas. (Lourenço, 2019). Desse modo, de acordo com a Portaria N° 1082 de 2018, popularmente conhecida como NR13 “Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares” (Brasil, 2018).

Para que uma caldeira esteja em pleno funcionamento, primeiramente ela deve ser nutrida por uma fonte ininterrupta de água, esta água deve ser aquecida por meio de uma fonte de calor aplicada à caldeira, seja por meio da queima de combustíveis, como carvão, gás natural e óleo, assim, a água circula por meio de tubulações ao redor da fonte de calor ou por meio de trocadores. À medida que há variações de temperaturas nesse sistema térmico, a água é capaz de ser vaporizada, passando do seu estado líquido para um estado gasoso – esse vapor de água está em alta pressão (Beux, 2014). A figura 02 é capaz de ilustrar essa situação.

Como funcionam os motores a vapor

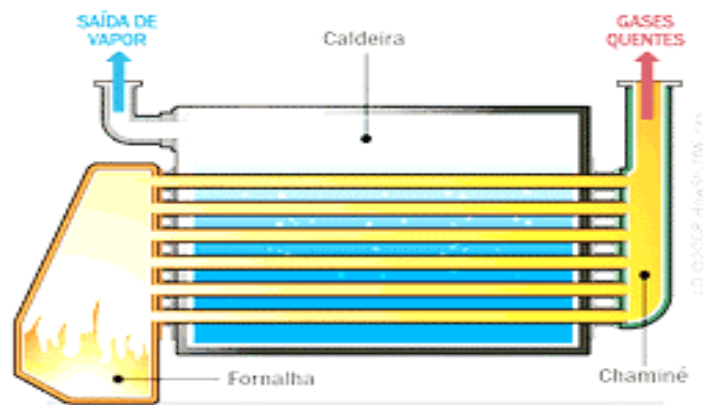


Figura 02 - Ilustração simplificada de uma caldeira flamotubular

Fonte: Repositório da Universidade de Coimbra, 2019.

Dessa forma, de acordo com a NR13, as caldeiras podem ser classificadas em algumas categorias, a depender da pressão a ser empregada:

- Categoria A: pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm²), com volume superior a 100 Litros.
- Categoria B: pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm²) e inferior a 1 960 kPa (19,98 kgf/cm²), volume interno superior a 100 Litros e o produto entre a pressão de operação em kPa e o volume interno em m³ seja superior a 6 (seis) (Brasil, 2018).

2.2.5 Manutenção Preventiva em Caldeiras

A manutenção industrial é um pilar fundamental para garantir o funcionamento contínuo e eficiente do maquinário utilizado nas operações fabris, adotando abordagens tanto preventivas quanto corretivas. Em um mercado cada vez mais orientado pela busca incessante por qualidade e produtividade, a escolha e implementação da técnica de manutenção adequada desempenha um papel crucial na definição da rotina fabril e na consecução dos objetivos organizacionais (Castro, 2022).

Ao ponderar sobre o tema, surge uma dualidade entre a adoção de manutenções preventivas em vez de corretivas. As manutenções corretivas frequentes acarretam custos significativos devido a paradas inesperadas na produção, incentivando a busca por métodos preventivos. Estes visam evitar falhas críticas, especialmente em equipamentos de alto risco, como caldeiras, prolongando sua vida útil (Lourenço, 2019).

O uso de ferramentas de qualidade é crucial para identificar, medir e resolver possíveis problemas que afetam o desempenho dos equipamentos críticos, como as caldeiras. Ferramentas como FMEA, FTA, diagrama de Pareto e análise de causa raiz são empregadas para avaliar riscos e identificar áreas críticas que requerem intervenção preventiva. Essas técnicas reduzem paradas não programadas, garantindo a segurança e a confiabilidade dos processos industriais (Castro, 2022).

Para garantir um ambiente operacional seguro, é de suma importância que as caldeiras sejam submetidas aos testes de seus componentes, como supracitado, integrando grande parte do conjunto. Assim, com o objetivo de conservar a longo prazo esses equipa-

mentos industriais, além de evitar falhas, tem-se o emprego das manutenções preventivas que –ao contrário das práticas corretivas – trabalham em prol da realização de inspeções regulares, como testes de desempenho, limpeza, lubrificação, ajustes e substituição preventiva de componentes desgastados (Nascimento e Souza, 2017).

Considerando essa perspectiva, é inegável que a adoção de estratégias de manutenção preventiva em caldeiras proporciona uma gama de vantagens substanciais no que diz respeito à segurança operacional (Araújo, 2019). Nesse contexto, é crucial destacar que diversos componentes são minuciosamente inspecionados e submetidos a testes rigorosos, dentre os quais se destacam as tubulações, as válvulas e o controle da taxa de liberação de bolhas por minuto. Essas medidas não apenas visam evitar falhas repentinas e acidentes, mas também contribuem para a preservação da integridade dos equipamentos, garantindo uma operação confiável e eficiente a longo prazo (Nascimento e Souza, 2017).

3. CONCLUSÃO

Tendo em vista que o presente estudo buscou analisar as Condições e Benefícios Associados à Manutenção Preventiva de Caldeiras, bem como uma comparação entre manutenções preventivas e manutenções corretivas em sistemas industriais, com o fito de investigar a influência das manutenções na confiabilidade e na vida útil dos equipamentos. Sendo assim, com base nas discussões empreendidas e reflexões trazidas neste recorte, acredita-se que os objetivos foram plenamente alcançados, uma vez que a Manutenção Preventiva demonstrou um desempenho superior em comparação com a Manutenção Corretiva, minimizando possíveis impactos negativos relacionados à plena utilização das caldeiras, demonstrando que a implementação de práticas preventivas contribui significativamente para a eficiência operacional e sustentabilidade dos processos industriais.

Nessa assertiva, entendeu-se que para que este processo opere com máxima eficiência é essencial que as manutenções das caldeiras sejam feitas regularmente, sobretudo, de forma preventiva, com o intuito de prevenir e evitar posteriores impasses que comprometam a rotina de produção. Além disso, a promoção de manutenções preventivas em caldeiras garante a vida útil desses equipamentos e preservação. Logo, essa reflexão aponta para a importância de uma abordagem preventiva e contínua no gerenciamento das caldeiras, confirmando a eficácia dessas práticas para alcançar um equilíbrio entre eficiência energética e sustentabilidade ambiental na indústria.

Dessa forma, é indubitável enfatizar que a pesquisa confirma a relação direta entre a implementação da manutenção preventiva de caldeiras e a eficiência energética desses equipamentos, verificando que tais práticas reduzem falhas e aumentam a durabilidade das caldeiras. Como limitações, destaca-se a necessidade de maior investimento inicial em treinamento e aquisição de recursos, bem como a dificuldade na mudança de cultura organizacional para adotar práticas preventivas. Recomenda-se, assim, para estudos futuros, explorar a aplicação de novas tecnologias em manutenção preditiva e a análise de diferentes tipos de combustíveis e suas influências na manutenção. Tais investigações poderão aprimorar as práticas de manutenção preventiva e maximizar a eficiência energética dos equipamentos industriais.



REFERÊNCIAS

- ARRUDA, Nathan. **Implementação de um sistema de gestão de manutenção preventiva industrial**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/20078>. Acesso em: 06 de abr. 2024.
- ARAUJO, W., TEODÓSIO, F., & CAMPOS, P. (2019). **Study of the inspection of a flamotubular boiler through the codes asme and NR-13**. *ITEGAM-JETIA*, 5(19), 90-97. Disponível em: <https://itegam-jetia.org/journal/index.php/jetia/article/view/499>. Acesso em: 02 maio 2024.
- BEGAS, GF; BERMUDEZ, JC; SOUZA, LT de; VILLAROEL, MBR; KALILI, RM MACHINE LEARNING NA MANUTENÇÃO PRESCRITIVA DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS. **Revista Contemporânea**, [S. l.], v. 6, pág. e4673, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N6-081. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/4673>. Acesso em: 31 ago. 2024.
- BEUX, Giovana. **Avaliação das Condições de Segurança na Operação de Caldeiras à Vapor**. 2014. 60 f. Monografia (Especialização em Engenharia em Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica do Estado do Paraná, Paraná, 2014. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/22255/3/PB_CEEST_V_2014_17.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.
- BOTELHO, Manoel. **Operação de Caldeiras**: gerenciamento, controle e manutenção. 2015. 212 p. 2 ed. Blucher – São Paulo, 2015.
- BRASIL. Portaria N° 1.082, de 18 de dezembro de 2018. **NR-13 Caldeiras, Vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento**. Brasília, DF, 18 dez 2018.
- CASTRO, Oberdan. **Aplicação de plano de manutenção preventiva em caldeira mista com auxilio da ferramenta FMEA**. 2022. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/674834442/TCC-Manutencao-Em-Caldeiras>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- FARIAS, Leonel & Sellitto, Miguel. (2011). Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**. 12. 07-16. 10.31514/rliberato.2011v12n17.p07.
- HÉMERY, D.; DEBEIR, J.- C.; DÉLEAGE, J.- P. **Uma história da energia**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1991.
- LOURENÇO, Francis. **Análise das condições de segurança em operações com caldeiras à vapor**. 2019. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -- Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/1215>. Acesso em: 07 maio 2024.
- NASCIMENTO, Lucas; SOUZA, Tatiana. **Automação de dispositivos de segurança e manutenção para caldeiras, com aplicação da NR13, buscando a otimização do processo e viabilidade econômica**. 2017. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2017. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/5416>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- NASCIMENTO, João Paulo Smith Nazario. **Planejamento da produção de vapor em múltiplas caldeiras industriais**. 2014. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/1191/1/Planejamento%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20vapor%20em%20m%C3%BAltiplas%20caldeiras%20industriais.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- SILVA, Ricardo; SANTOS, Fabiola. Análise de risco em caldeiras utilizando a técnica HAZOP. **III Simpósio de Engenharia de Produção**. 12 p. João Pessoa. 27 a 29 de maio de 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/29750>. Acesso em: 2 maio 2024.
- SILVEIRA, Leila. **Máquina a vapor**. Departamento de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~leila/vapor.htm>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- SOARES, Gustavo Albano. **Desenvolvimento de política de manutenção baseada nos conceitos da indústria 4.0: Smart system aplicado para uma caldeira de uma indústria papelreira**. 2022. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/>. Acesso em: 06 abr. 2024.



O IMPACTO DA ENGENHARIA MECÂNICA NA OTIMIZAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES

THE IMPACT OF MECHANICAL ENGINEERING ON THE OPTIMIZATION
OF SOLAR PANELS

Stefane Thayllon de Barros Maciel
Thiago Santana de Oliveira

27

Resumo

A engenharia mecânica desempenha um papel crucial no avanço da tecnologia de painéis solares, contribuindo significativamente para a otimização do desempenho e eficiência dos mesmos. O objetivo principal desse trabalho é Apontar de que forma a engenharia mecânica contribuiu para o aumento da eficácia dos painéis solares. Os objetivos secundários são: Analisar a evolução das tecnologias de fabricação de células solares e sua relação com os avanços em engenharia mecânica; avaliar o impacto das inovações em materiais e processos de manufatura sobre a eficiência energética dos painéis solares; investigar o papel da engenharia mecânica na resolução de desafios técnicos, como a dissipação de calor e a maximização da captação de luz solar. O estudo em questão adotará uma metodologia de revisão bibliográfica, focando em como a engenharia mecânica pode melhorar a eficiência dos painéis solares. A análise será restrita a publicações dos últimos 10 anos para garantir a atualidade das informações. Fontes renomadas como Scopus, Web of Science e IEEE Xplore serão utilizadas, além de literatura especializada na área de engenharia mecânica e energia solar. Conclui-se que a engenharia mecânica é um elemento chave no avanço da tecnologia solar, contribuindo significativamente para a eficiência e sustentabilidade dos painéis solares. Inovações nesta área não apenas superaram desafios técnicos, mas também impulsionaram o desempenho energético, ressaltando a importância da engenharia mecânica na busca por soluções energéticas sustentáveis. A colaboração interdisciplinar entre engenharia mecânica e tecnologia solar é essencial para o desenvolvimento de um futuro energético mais limpo e eficiente.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica. Otimização. Painéis Solares. Eficiência Energética. Tecnologias Renováveis.

Abstract

Mechanical engineering plays a crucial role in the advancement of solar panel technology, contributing significantly to the optimization of their performance and efficiency. The main objective of this work is to point out how mechanical engineering has contributed to the increase in the efficiency of solar panels. The secondary objectives are: to analyze the evolution of solar cell manufacturing technologies and their relationship with advances in mechanical engineering; to evaluate the impact of innovations in materials and manufacturing processes on the energy efficiency of solar panels; to investigate the role of mechanical engineering in solving technical challenges, such as heat dissipation and maximizing sunlight capture. The study in question will adopt a literature review methodology, focusing on how mechanical engineering can improve the efficiency of solar panels. The analysis will be restricted to publications from the last 10 years to ensure the currentness of the information. Renowned sources such as Scopus, Web of Science and IEEE Xplore will be used, in addition to specialized literature in the area of mechanical engineering and solar energy. It is concluded that mechanical engineering is a key element in the advancement of solar technology, contributing significantly to the efficiency and sustainability of solar panels. Innovations in this area have not only overcome technical challenges but also boosted energy performance, highlighting the importance of mechanical engineering in the search for sustainable energy solutions. Interdisciplinary collaboration between mechanical engineering and solar technology is essential for the development of a cleaner and more efficient energy future.

Keywords: Mechanical Engineering. Optimization. Solar Panels. Energy Efficiency. Renewable Technologies.

1. INTRODUÇÃO

A contribuição da Engenharia Mecânica para a eficiência de painéis solares é um campo de estudo que aborda a interseção entre as tecnologias de energia renovável e os princípios mecânicos. Segundo Petroski (1985), a distinção entre ciência e engenharia reside no conhecimento versus ação, e é através da aplicação de conceitos de termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos que é possível otimizar o desempenho dos painéis solares. A eficiência energética destes dispositivos é crucial para a sustentabilidade e para o avanço das energias limpas (REN21, 2019).

Ele contribui significativamente para o desenvolvimento de materiais e técnicas de fabricação que aumentam a capacidade dos painéis solares de converter a luz solar em energia elétrica. A utilização de revestimentos especiais, a melhoria na condução térmica e a aerodinâmica dos painéis são exemplos de como a engenharia mecânica pode influenciar positivamente a eficiência energética (IRENA, 2020).

A relevância desta pesquisa reside na sua capacidade de contribuir para o avanço do conhecimento na intersecção entre a engenharia mecânica e as energias renováveis. Ao focar na eficiência dos painéis solares, o estudo pode identificar métodos de otimização que reduzam custos e aumentem a acessibilidade da energia solar, incentivando sua adoção mais ampla e impactando positivamente a matriz energética global (UFPB, 2020).

As contribuições sociais e acadêmicas deste estudo são multifacetadas. Socialmente, a pesquisa pode levar a uma maior independência energética e a uma redução na pegada de carbono, alinhando-se com os objetivos de desenvolvimento sustentável (REN21, 2019). Academicamente, pode preencher lacunas de conhecimento e inspirar futuras investigações, fortalecendo o campo da engenharia mecânica e promovendo uma sinergia entre teoria e prática que é essencial para o progresso científico e tecnológico (USP, 2018).

A constante evolução tecnológica impulsiona o aprimoramento de sistemas sustentáveis, essencial para o avanço da eficiência energética. Nesse contexto, questiona-se: Qual é o papel da engenharia mecânica na melhoria dos painéis solares, em termos de estrutura, calor e eficiência energética?

O objetivo geral desse trabalho é apontar de que forma a engenharia mecânica contribuiu para o aumento da eficácia dos painéis solares. Os objetivos secundários são: analisar a evolução das tecnologias de fabricação de células solares e sua relação com os avanços em engenharia mecânica; avaliar o impacto das inovações em materiais e processos de manufatura sobre a eficiência energética dos painéis solares; investigar o papel da engenharia mecânica na resolução de desafios técnicos, como a dissipação de calor e a maximização da captação de luz solar.

Este trabalho adotará uma metodologia de revisão bibliográfica, com o objetivo de analisar o impacto da engenharia mecânica na otimização de painéis solares. Será realizada uma busca sistemática por literatura relevante, priorizando artigos publicados nos últimos 10 anos para garantir a atualidade das informações. As fontes de pesquisa incluirão bases de dados acadêmicas renomadas, como Scopus, Web of Science, e IEEE Xplore, além de livros e publicações especializadas na área de engenharia mecânica e energia solar. Para a seleção dos materiais, serão utilizados descritores e palavras-chave estratégicos, tais como “engenharia mecânica”, “otimização”, “painéis solares”, “eficiência energética” e “tecnologias renováveis”.

2. ENERGIA SOLAR

A energia solar é gerada a partir da radiação solar, que é a energia emitida pelo Sol na forma de luz e calor. Esta radiação é composta por uma ampla gama de comprimentos de onda, incluindo luz visível, ultravioleta e infravermelha. A Terra recebe uma quantidade enorme de energia solar diariamente, suficiente para suprir várias vezes a demanda energética global. A captação e utilização eficiente dessa energia são fundamentais para a transição para um futuro energético sustentável.

Os sistemas fotovoltaicos são uma aplicação crucial da energia solar, onde a luz solar é convertida diretamente em eletricidade utilizando células fotovoltaicas. Estes sistemas têm se tornado cada vez mais eficientes e acessíveis, contribuindo significativamente para a geração de energia limpa e renovável. A eficiência dos painéis solares fotovoltaicos tem aumentado continuamente, com a introdução de novos materiais semicondutores e técnicas de fabricação inovadoras. Tecnologias emergentes, como as células de perovskita, têm mostrado um potencial significativo para aumentar ainda mais a eficiência e reduzir os custos de produção.

A energia solar oferece inúmeros benefícios ambientais e econômicos. Do ponto de vista ambiental, a energia solar é uma fonte de energia limpa que não emite gases de efeito estufa ou poluentes durante a sua utilização. Isso contribui para a redução das emissões de carbono e ajuda a mitigar as mudanças climáticas. Além disso, a energia solar não requer a extração de recursos naturais finitos, como combustíveis fósseis, o que preserva os ecossistemas e reduz a degradação ambiental.

Economicamente, a energia solar pode proporcionar uma redução significativa nos custos de energia a longo prazo. Embora o investimento inicial em tecnologias solares possa ser elevado, os custos operacionais e de manutenção são relativamente baixos. Além disso, a energia solar pode gerar empregos em diversos setores, desde a pesquisa e desenvolvimento até a fabricação, instalação e manutenção de sistemas solares.

Nos últimos anos, a tecnologia fotovoltaica tem experimentado avanços notáveis, impulsionados por inovações científicas, redução de custos e uma crescente demanda por fontes de energia renovável. A eficiência dos painéis solares aumentou significativamente, com novas tecnologias como as células de perovskita mostrando um potencial enorme para superar os limites de eficiência dos painéis tradicionais. As células de perovskita, por exemplo, são mais baratas de produzir e podem ser combinadas com células de silício para criar painéis com eficiência superior a 30%.

A queda nos custos dos sistemas solares é outro fator crucial que tem impulsionado a adoção em massa dessa tecnologia. De acordo com relatórios recentes, o custo da energia solar caiu mais de 80% na última década. Isso se deve a avanços na produção em larga escala, melhorias nos processos de fabricação e inovações na cadeia de suprimentos. A redução de custos tem tornado a energia solar mais acessível para consumidores residenciais e empresas, além de ser uma opção competitiva em grandes projetos de energia.

Os avanços em tecnologias de armazenamento de energia, como as baterias de íons de lítio, têm permitido a armazenagem do excesso de energia gerada durante o dia para uso noturno ou em dias nublados. O desenvolvimento de sistemas de armazenamento mais eficientes e econômicos está permitindo que a energia solar seja uma fonte de energia mais confiável e estável.

2.1 Células Solares

As células solares, também conhecidas como células fotovoltaicas, são dispositivos que convertem a luz solar diretamente em eletricidade através do efeito fotovoltaico. Este fenômeno foi descoberto por Alexandre Edmond Becquerel em 1839, marcando o início da compreensão científica sobre a conversão da luz solar em energia elétrica. Desde então, as células solares têm evoluído significativamente, tornando-se uma das tecnologias mais promissoras e amplamente utilizadas para a geração de energia renovável.

As células solares são compostas por materiais semicondutores, geralmente silício, que absorvem fótons da luz solar. Quando os fótons atingem o material semicondutor, eles excitam os elétrons, criando pares de elétrons e lacunas. Este movimento de elétrons gera uma corrente elétrica, que pode ser coletada e utilizada para alimentar dispositivos elétricos ou ser armazenada em baterias para uso posterior.

2.1.1 Tipos de células solares

Existem vários tipos de células solares, cada uma com suas próprias características e níveis de eficiência:

- a) Células de Silício Monocristalino: São feitas de um único cristal de silício e são conhecidas por sua alta eficiência e durabilidade. No entanto, são mais caras de produzir.
- b) Células de Silício Policristalino: São feitas de múltiplos cristais de silício e são menos eficientes que as células monocristalinas, mas são mais baratas de produzir.
- c) Células de Filme Fino: Utilizam materiais como telureto de cádmio ou seleneto de cobre, índio e gálio (CIGS). São mais flexíveis e podem ser aplicadas em uma variedade de superfícies, mas geralmente têm menor eficiência.
- d) Células de Perovskita: Uma tecnologia emergente que tem mostrado um potencial significativo para aumentar a eficiência e reduzir os custos de produção. As células de perovskita são mais baratas de produzir e podem ser combinadas com células de silício para criar painéis com eficiência superior a 30%.

2.1.2 Evolução histórica

A evolução das células solares é uma jornada fascinante que começou no século XIX e continua a avançar rapidamente até os dias atuais. A descoberta do efeito fotovoltaico por Alexandre Edmond Becquerel em 1839 marcou o início da compreensão científica sobre a conversão da luz solar em energia elétrica. Este fenômeno, onde a luz solar gera uma corrente elétrica em um material, foi a base para o desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas.

Em 1883, Charles Fritts deu um passo significativo ao criar a primeira célula solar prática, utilizando selênio revestido com uma fina camada de ouro. Embora a eficiência desta célula fosse extremamente baixa, cerca de 1%, ela representou um marco importante na aplicação prática da tecnologia fotovoltaica. A contribuição teórica de Albert Einstein, explicando o efeito fotoelétrico em 1905, forneceu uma base científica sólida que foi fundamental para o desenvolvimento subsequente da tecnologia. Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921 por este trabalho, destacando a importância de sua contribuição.



para a ciência e a tecnologia.

A metade do século XX testemunhou avanços significativos na tecnologia fotovoltaica, impulsionados pelo desenvolvimento da física do estado sólido. Em 1954, cientistas da Bell Labs criaram a primeira célula solar de silício prática, com uma eficiência de cerca de 6%. Este desenvolvimento foi crucial, pois o silício se mostrou um material muito mais eficiente e viável economicamente para a produção de células solares. A criação desta célula solar de silício marcou o início da produção em massa e da comercialização da energia solar.

Com o passar das décadas, a eficiência das células solares foi aprimorada constantemente através da introdução de novos materiais semicondutores e técnicas de fabricação inovadoras. Nos anos 70, a crise energética reacendeu o interesse por fontes de energia renováveis, incluindo a energia solar. Este período foi marcado por investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento, que resultaram em células solares mais acessíveis e confiáveis. A indústria solar começou a se expandir rapidamente, com a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências, empresas e até em dispositivos espaciais, onde a confiabilidade e a independência da rede elétrica são essenciais.

Nos últimos dez anos, a tecnologia fotovoltaica tem experimentado avanços notáveis, impulsionados por inovações científicas, redução de custos e uma crescente demanda por fontes de energia renovável. A eficiência dos painéis solares aumentou significativamente, com novas tecnologias como as células de perovskita mostrando um potencial enorme para superar os limites de eficiência dos painéis tradicionais. As células de perovskita, por exemplo, são mais baratas de produzir e podem ser combinadas com células de silício para criar painéis com eficiência superior a 30%.

A queda nos custos dos sistemas solares é outro fator crucial que tem impulsionado a adoção em massa dessa tecnologia. De acordo com relatórios recentes, o custo da energia solar caiu mais de 80% na última década. Isso se deve a avanços na produção em larga escala, melhorias nos processos de fabricação e inovações na cadeia de suprimentos. A redução de custos tem tornado a energia solar mais acessível para consumidores residenciais e empresas, além de ser uma opção competitiva em grandes projetos de energia.

Os avanços em tecnologias de armazenamento de energia, como as baterias de íons de lítio, têm permitido a armazenagem do excesso de energia gerada durante o dia para uso noturno ou em dias nublados. O desenvolvimento de sistemas de armazenamento mais eficientes e econômicos está permitindo que a energia solar seja uma fonte de energia mais confiável e estável.

2.2 Relação entre a engenharia mecânica e os painéis solares

No alvorecer do século XXI, a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a sustentabilidade ambiental impulsionou a adoção da energia solar. Incentivos governamentais e avanços tecnológicos contribuíram para a redução dos custos, tornando a energia solar uma alternativa competitiva em relação às fontes de energia convencionais. Além disso, a integração de tecnologias emergentes, como a nanotecnologia, fomentou o desenvolvimento de células solares orgânicas e flexíveis, abrindo caminho para novas aplicações e possibilitando a integração da tecnologia fotovoltaica em uma diversidade de superfícies e produtos.

A trajetória das células solares é exemplificada pelo dinamismo e pela constante evolução tecnológica, onde os avanços na engenharia mecânica desempenharam um papel

preponderante. A integração de novos materiais, processos de fabricação e conceitos de engenharia mecânica contribuiu para a otimização do desempenho e da viabilidade econômica dos painéis solares. A energia solar, por meio da captação de luz e energia emitida pelo sol, é uma das principais fontes de energia renovável disponíveis hoje em dia. É também considerada um dos mercados mais promissores no setor de energia renovável (IRENA, 2020).

Essa progressão reflete não apenas o aprimoramento contínuo das tecnologias existentes, mas também a incorporação de inovações disruptivas que expandem as fronteiras do que é tecnicamente possível. A intersecção entre a pesquisa teórica e a aplicação prática tem sido um vetor crucial para o desenvolvimento sustentável e a transição energética global. A energia solar, portanto, não é apenas um testemunho do engenho humano, mas também uma peça-chave na busca por soluções energéticas que sejam ambientalmente responsáveis e economicamente viáveis.

A busca por energia limpa tem proporcionado um aumento da demanda mundial por estas tecnologias, resultando na redução de custo de fabricação e implantação dos sistemas de painéis fotovoltaicos. Essa fonte energética passa a ser uma das principais para o sistema de geração distribuída, pois os incentivos governamentais, tecnologias avançadas, baixo custo operacional e de manutenção, geração de emprego e energia limpa e renovável são aceleradores para o desenvolvimento da tecnologia e para o cuidado com o meio ambiente e a saúde da população (REN21, 2019).

Dentro desse panorama de inovações, destaca-se a célula solar de perovskita, que tem se mostrado notavelmente eficaz na conversão da energia fotônica em eletricidade, alcançando eficiências superiores a 26% em ambientes controlados de laboratório. A tecnologia de células solares tandem, que une células de perovskita a células de silício, representa outro marco, atingindo eficiências recordes de até 33,7%. Esses avanços não só elevam a eficiência na conversão de energia solar em elétrica, mas também sinalizam um potencial redução de custos e maior acessibilidade da energia solar para uma base mais ampla de consumidores. As células solares de Perovskita (CSPs) são baseadas em haletos, um material semicondutor promissor para aumentar a eficiência das células solares. O químico alemão Gustav Rose foi quem descobriu o minério Perovskita (CaTiO_3), mas em 1839 o mineralogista russo Lev Alexeievitch Perovsky conseguiu obter em laboratório uma estrutura sintética similar ao minério natural, passando assim esse minério a ser chamado de perovskita (Salman; Hussain; Bakr, 2016).

No contexto da evolução tecnológica dos sistemas fotovoltaicos, a integração de tecnologias de rastreamento solar e sistemas de concentração solar representa um marco significativo. A funcionalidade de rastreamento solar é projetada para sincronizar os painéis fotovoltaicos com o movimento diurno do sol, otimizando assim a absorção de energia solar. Paralelamente, os sistemas de concentração solar empregam mecanismos ópticos, como lentes ou espelhos, para intensificar a incidência de luz solar sobre as células fotovoltaicas. Esta abordagem não apenas melhora a eficiência energética dos painéis, mas também contribui para uma redução substancial na quantidade de material semicondutor necessário, o que pode resultar em uma diminuição significativa dos custos de produção.

Lopes *et al.* (2022) definem rastreador solar como um dispositivo que orienta um sistema fotovoltaico na direção do Sol de forma a captar mais energia, diminuindo o ângulo de incidência entre a luz do Sol e as células do painel solar, tendo como consequência um aumento de produção de energia quando comparados a sistemas com painéis fixos.

A engenharia mecânica é essencial na otimização de sistemas de painéis solares, integrando conhecimentos de termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor

para elevar a eficiência e durabilidade desses dispositivos. Segundo Henry Petroski, professor de engenharia civil da Duke University, a distinção entre ciência e engenharia reside no conhecimento versus ação (Petroski, H., 1985), uma dicotomia que se revela crucial na aplicação de teorias científicas para resolver problemas práticos, como a otimização de painéis solares visando o aumento da captação energética.

A otimização desses sistemas transcende a melhoria do rendimento energético, abrangendo também a sustentabilidade e a viabilidade econômica dos projetos. Albert Einstein já advertia sobre a necessidade de renovar seu pensamento para solucionar problemas (Einstein, A., 1946), um conceito que a engenharia mecânica leva a sério ao buscar inovações e tecnologias para enfrentar os desafios presentes na otimização de painéis solares.

Pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) realizaram um estudo sobre otimização multiobjetivo em sistemas energéticos, investigando métodos para incrementar a eficiência de painéis solares, levando em conta aspectos energéticos, ambientais e econômicos (UFPB, 2020). Este estudo exemplifica o papel da engenharia mecânica no avanço de um futuro sustentável por meio da otimização de tecnologias de energia renovável.

Ademais, a otimização no design de sistemas mecânicos é um campo de pesquisa em crescimento, conforme evidenciado por trabalhos da Universidade de São Paulo (USP), que aplicam otimização paramétrica para melhorar as características e eficiência de painéis solares (USP, 2018). Tais pesquisas sublinham a relevância da engenharia mecânica na incessante busca por soluções inovadoras e sustentáveis no campo da energia renovável.

3. CONCLUSÃO

Conclui-se que a engenharia mecânica representa uma força motriz essencial para o progresso da tecnologia solar. A sinergia entre a engenharia mecânica e a evolução dos painéis solares manifesta-se na precisão e eficiência aprimoradas dos processos de fabricação. Inovações em materiais e métodos de produção, fomentadas pela engenharia mecânica, não apenas elevaram a eficiência energética dos painéis solares, mas também venceram desafios técnicos notáveis. A habilidade de transformar uma maior quantidade de luz solar em energia elétrica, reduzindo a perda de calor, atesta o impacto transformador da engenharia mecânica na otimização dos painéis solares.

Esta área tem sido crucial na implementação de sistemas de refrigeração mais eficientes e no desenvolvimento de estruturas otimizadas para a captação de luz solar. Essas melhorias são fundamentais para o aprimoramento do desempenho dos painéis solares e para a sustentabilidade de longo prazo da energia solar como fonte limpa de energia. Ademais, a engenharia mecânica persiste como um campo de pesquisa e desenvolvimento vital, perseguindo inovações que prometem tornar a energia solar ainda mais eficiente e acessível no futuro.

Em resumo, a contribuição da engenharia mecânica ao setor de energia solar é inestimável e continuará a ser um pilar no desenvolvimento de tecnologias avançadas. A interdependência entre essas duas áreas é um exemplo eloquente de como a colaboração interdisciplinar pode resultar em avanços significativos em tecnologias sustentáveis. Com o avanço da sociedade para um futuro mais sustentável, a engenharia mecânica se manterá na linha de frente, assegurando que os painéis solares sejam cada vez mais eficientes na captura e conversão da energia solar, contribuindo, assim, para um mundo mais sustentável e com eficiência energética.

REFERÊNCIAS

SOLUÇÕES EM INFRAESTRUTURA E GERAÇÃO DE ENERGIA. A Evolução das Tecnologias de Energia Solar nos Últimos Anos - Exsergia. Acesso em: 15 nov. 2024.

AHMED, M. I.; HABIB, A.; JAVAID, S. S. **Perovskite solar cells: potentials, challenges, and opportunities**. International Journal of Photoenergy, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/592308> . Acesso em: 15 set. 2024.

Boix P. P., Nonomura K., Mathews N. e Mhaisalkar S. G., Progresso atual e perspectivas futuras para células solares de perovskita orgânica/inorgânica, *Materials Today*. (2014) **17**, nº 1, 16–23, <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2013.12.002>, 2-s2.0-84893927297.

Green M. A., Ho-Baillie A. e Snaith H. J., O surgimento de células solares de perovskita, *Nature Photonics*. (2014) **8**, nº 7, 506–514, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.134>, 2-s2.0-84903544471.

Heo J. H., Song D. H., Han H. J. et al., Planar $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ células solares de perovskita com eficiência média de conversão de energia constante de 17,2%, independentemente da taxa de varredura, *Materiais Avançados*. (2015) <https://doi.org/10.1002/adma.201500048>.

Hodes G. e Cahen D., Fotovoltaicos: as células de perovskita rolam para frente, *Nature Photonics*. (2014) **8**, nº 2, 87–88, <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.5>, 2-s2.0-84893318149.

Im S. H., Heo J.-H., Han H. J., Kim D. e Ahn T., 18,1% de CH invertido sem histerese $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ células solares híbridas planares de perovskita, *Energia e Ciências Ambientais*. (2015) **8**, 1602–1608, <https://doi.org/10.1039/C5EE00120J>.

Luo S. e Daoud W. A., Progresso recente em células solares de perovskita de haleto orgânico-inorgânico: mecanismos e design de materiais, *Journal of Materials Chemistry A*. (2014) **3**, 8992–9010.

Machado, C. T.; Miranda, F. S.; *Rev. Virtual Quim.* **2015**

National Renewable Energy Laboratory (NREL) Home Page | NREL. Acesso em: 16 set. 2024.

Niu G., Guo X. e Wang L., Revisão do progresso recente na estabilidade química de células solares de perovskita, *Journal of Materials Chemistry A*. (2014) **3**, 8970–8980.

Park, N.-G. **Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology**. *Materials Today* 2015, 18 (2), 65.

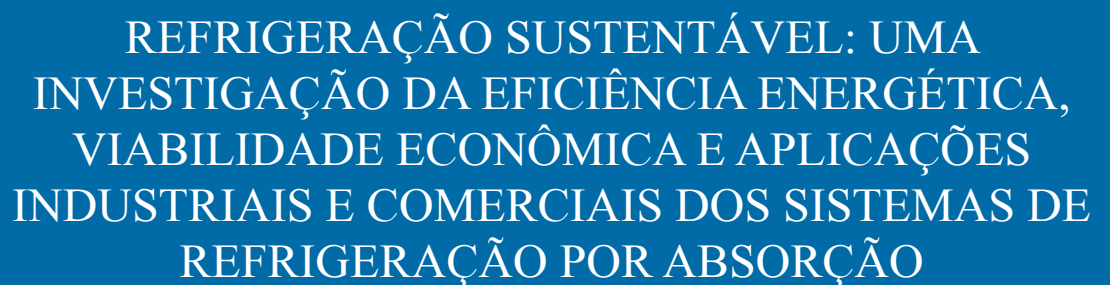
REN21. **Renewables 2019 Global Status Report**. REN21, 2019. Disponível em: RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT (ren21.net). Acesso em: 20 set. 2024.

RIZZO, Fernando Cosme; MEDEIROS, Elyas Ferreira de; SHAYAN, Rafael Amaral. **Estudos prospectivos em energia fotovoltaica**. Brasília: CGEE, 2009

ROCHA, Luiz Célio Souza; ROTELLA JUNIOR, Paulo; AQUILA, Giancarlo; MAHERI, Alireza. **Multiobjective optimization of hybrid wind-photovoltaic plants with battery energy storage system: current situation and possible regulatory changes**. João Pessoa: UFPB, 2020.

Salman, S. A.; Hussain, F. I.; Bakr, N. A. **Structural Study of $\text{Ba}_{1-x}\text{Ca}_x\text{TiO}_3$ Ceramic Perovskite Material Using X-ray Diffraction Analysis**. *Journal of Nanotechnology & Advanced Materials*, 2016. Disponível em: bhy16640x872g1.pdf (naturalspublishing.com)





SUSTAINABLE REFRIGERATION: AN INVESTIGATION OF ENERGY EFFICIENCY, ECONOMIC FEASIBILITY, AND INDUSTRIAL AND COMMERCIAL APPLICATIONS OF ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEMS

Diego Barbosa Reis

28

Resumo

Este artigo científico analisa a necessidade crescente de soluções de refrigeração mais sustentáveis, destacando o problema das emissões e do consumo excessivo de energia associado aos sistemas convencionais de refrigeração. O objetivo geral da pesquisa foi investigar a eficiência energética dos sistemas de refrigeração por absorção, avaliar sua viabilidade econômica e explorar suas aplicações potenciais em setores industriais e comerciais. Os sistemas de refrigeração por absorção se apresentam como uma alternativa promissora, uma vez que utilizam uma combinação de substâncias químicas para gerar o efeito de resfriamento, eliminando a dependência de eletricidade para sua operação. A metodologia escolhida para o desenvolvimento do estudo foi de natureza bibliográfica, permitindo uma análise abrangente e fundamentada sobre o tema. As principais considerações finais da pesquisa indicam que os sistemas de refrigeração por absorção não apenas oferecem vantagens significativas em termos de eficiência energética, mas também apresentam viabilidade econômica para diversas aplicações. Este estudo reforça a importância de se adotar tecnologias mais sustentáveis na refrigeração, contribuindo para a redução do impacto ambiental e promovendo um uso mais racional dos recursos energéticos. Assim, o artigo contribui para um entendimento mais profundo sobre a relevância e as potencialidades dos sistemas de refrigeração por absorção no contexto atual.

Palavras-chave: Refrigeração Sustentável, Refrigeração por Absorção, Eficiência Energética.

Abstract

This scientific article examines the growing need for more sustainable refrigeration solutions, highlighting the issues of emissions and excessive energy consumption associated with conventional refrigeration systems. The primary objective of the research was to investigate the energy efficiency of absorption refrigeration systems, assess their economic feasibility, and explore their potential applications in industrial and commercial sectors. Absorption refrigeration systems emerge as a promising alternative, as they use a combination of chemical substances to generate the cooling effect, eliminating the reliance on electricity for their operation. The chosen methodology for developing the study was bibliographic in nature, enabling a comprehensive and well-founded analysis of the topic. The main findings of the research indicate that absorption refrigeration systems not only offer significant advantages in terms of energy efficiency but also demonstrate economic viability for various applications. This study underscores the importance of adopting more sustainable refrigeration technologies, contributing to environmental impact reduction and promoting more rational use of energy resources. Thus, the article contributes to a deeper understanding of the relevance and potential of absorption refrigeration systems in the current context.

Keywords: Sustainable Refrigeration, Absorption Refrigeration, Energy Efficiency.



1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração por absorção surgem como uma opção promissora aos convencionais sistemas de refrigeração que se apoiam em compressores mecânicos. Esses sistemas funcionam através da utilização de calor residual ou energia térmica de baixa qualidade como fonte de energia, tornando-os mais eficientes e ecologicamente responsáveis. Constituídos por fluidos refrigerantes e absorventes, eles realizam ciclos de absorção e evaporação para extrair o calor do ambiente, seguindo princípios essenciais da termodinâmica (Ferreira, 2018).

A pesquisa sobre sistemas de refrigeração por absorção é relevante pois contribui para avanços significativos na área de refrigeração sustentável. Ao investigar o funcionamento e o desempenho desses sistemas, é possível identificar oportunidades de melhoria e otimização, levando ao desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e econômicas. Além disso, a análise da viabilidade desses sistemas para diferentes aplicações industriais e comerciais fornece insights valiosos para tomadores de decisão, auxiliando na adoção de práticas mais sustentáveis e na redução do impacto ambiental das atividades humanas.

Sendo assim, o presente projeto tem como problema de pesquisa a seguinte pergunta: Qual é o potencial dos sistemas de refrigeração por absorção, utilizando calor residual ou energia térmica de baixa qualidade como fonte de energia, para atender às demandas de refrigeração em diferentes aplicações industriais e comerciais?

O objetivo principal do estudo é investigar o funcionamento dos sistemas de refrigeração por absorção, avaliando os fundamentos termodinâmicos relacionados à absorção do vapor pelo líquido absorvente, emissão de calor na solução concentrada e regeneração do líquido absorvente, considerando aspectos como eficiência energética, capacidade de refrigeração e temperaturas de evaporação e condensação. Os objetivos específicos da pesquisa foram: analisar os componentes-chave dos sistemas de refrigeração por absorção, incluindo gerador, absorvedor, evaporador e condensador, e como eles interagem para fornecer refrigeração eficaz; investigar a viabilidade dos sistemas de refrigeração por absorção para diferentes aplicações industriais e comerciais, avaliando custos de instalação e operação, disponibilidade de fontes de calor adequadas, benefícios ambientais e vantagens competitivas em relação aos sistemas convencionais; e identificar e abordar desafios técnicos, econômicos e regulatórios associados à implementação desses sistemas, como desenvolvimento de materiais específicos, compatibilidade com aplicações existentes e superação de barreiras de mercado.

As contribuições potenciais desta pesquisa são vastas e abrangentes, tanto para a sociedade quanto para a comunidade acadêmica. Em termos práticos, a implementação bem-sucedida de sistemas de refrigeração por absorção pode resultar em economias significativas de energia e reduções nas emissões de gases de efeito estufa, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas e para a preservação do meio ambiente. Além disso, essa pesquisa pode impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias e práticas sustentáveis, promovendo a inovação e a competitividade em diversos setores industriais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para esta pesquisa foi uma Revisão Bibliográfica. Nesse sentido, será realizada uma análise qualitativa e descritiva da literatura existente sobre o tema escolhido. O período dos artigos pesquisados abrangeu os últimos dez anos, visando incluir as publicações mais atualizadas e significativas sobre o assunto. As buscas foram conduzidas em bases de dados como *Scopus* e *Google Scholar*, além de bibliotecas digitais de instituições de ensino e pesquisa reconhecidas. Os descritores e palavras-chave utilizados na busca foram selecionados de acordo com a temática da pesquisa, incluindo termos como “refrigeração por absorção”, “sistemas de refrigeração sustentável”, “eficiência energética”, entre outros. Esses termos foram empregados para identificar estudos relevantes e abranger diferentes aspectos do tema em questão. Por meio desse método de Revisão Bibliográfica, esperou-se obter uma compreensão abrangente e atualizada do conhecimento existente sobre sistemas de refrigeração por absorção, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso no próximo semestre.

2.2 Resultados e Discussão

A crescente demanda por soluções de refrigeração sustentáveis tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias que não apenas atendem a requisitos operacionais, mas que também minimizam o impacto ambiental. Um dos sistemas que têm recebido destaque na literatura acadêmica é o sistema de refrigeração por absorção (Jales, 2024). Este artigo analisa quantitativamente a eficiência energética dos sistemas de refrigeração por absorção em comparação com sistemas tradicionais de refrigeração mecânica, com ênfase na capacidade de refrigeração em função da temperatura do calor residual utilizado.

Os sistemas de refrigeração por absorção representam uma área de pesquisa de extrema importância devido ao seu potencial para proporcionar soluções sustentáveis e eficientes em refrigeração. Enquanto os sistemas tradicionais dependem de compressores mecânicos que consomem grandes quantidades de energia elétrica, os sistemas de absorção utilizam calor residual ou energia térmica de baixa qualidade como fonte de energia, reduzindo assim a dependência de recursos não renováveis e minimizando as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, o estudo desses sistemas é essencial para promover a adoção de tecnologias mais sustentáveis e para enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas e à eficiência energética (Silva, 2019).

A compreensão dos conceitos termodinâmicos fundamentais, como a captura de vapor pelo material absorvente e o processo de regeneração para reiniciar o ciclo, é essencial para analisar o desempenho desses sistemas. Além disso, é fundamental examinar os elementos essenciais, como a unidade geradora, o componente de absorção, o evaporador e o condensador, para compreender a maneira como eles interagem para fornecer uma refrigeração eficiente (Ferreira, 2018).

A análise do bom funcionamento dos sistemas de refrigeração por absorção é essencial, levando em conta aspectos como a economia de energia, a capacidade de resfriamento e as temperaturas de evaporação e condensação. Técnicas como o uso de cálculos computacionais, a elaboração de modelos matemáticos e a realização de experimentos são utilizadas para esse estudo, fornecendo informações importantes sobre a aplicabilidade desses sistemas em diversos ambientes industriais e comerciais (Carneiro, 2020).





Figura 1. Refrigeração por absorção de vapor

Fonte: Nepin Acessórios Industriais (2024)

No entanto, é importante também considerar os desafios técnicos, econômicos e regulatórios associados à implementação desses sistemas, incluindo o desenvolvimento de materiais específicos, a compatibilidade com aplicações existentes e a superação de barreiras de mercado. Em suma, o estudo abrangente desses sistemas contribui para o avanço da tecnologia de refrigeração sustentável, oferecendo soluções mais eficientes e ambientalmente amigáveis para diversas aplicações.

A necessidade de refrigeração é cada vez mais presente em nosso cotidiano, seja para manter alimentos frescos, conservar medicamentos ou climatizar ambientes. No entanto, o uso de sistemas de refrigeração convencionais, baseados em compressores mecânicos, apresenta alguns desafios do ponto de vista da sustentabilidade (Matos, 2019).

Diante desse cenário, surge a investigação sobre sistemas de refrigeração por absorção, uma alternativa promissora do ponto de vista da eficiência energética, viabilidade econômica e aplicações industriais e comerciais. Os sistemas de refrigeração por absorção utilizam a energia térmica, em vez da energia elétrica, como fonte de trabalho, o que reduz significativamente o consumo de energia (Martin, 2017).

A eficiência energética é uma das principais vantagens dos sistemas de refrigeração por absorção. Comparados aos sistemas convencionais, eles conseguem aproveitar melhor o calor residual e utilizar fontes alternativas de energia térmica, como resíduos industriais ou energia solar. Isso resulta em uma redução considerável das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Martin, 2017).

Além disso, a viabilidade econômica também é um fator a ser considerado. Embora os sistemas de refrigeração por absorção possam ter um custo inicial mais elevado, eles apresentam uma maior vida útil e menor necessidade de manutenção se comparados aos sistemas convencionais. Isso resulta em economias a longo prazo, especialmente em indústrias e estabelecimentos comerciais que demandam grande quantidade de refrigeração (Silva, 2019).

Quanto às aplicações industriais e comerciais, os sistemas de refrigeração por absorção têm sido amplamente utilizados em setores como a indústria química, petroquímica e alimentícia. Eles são capazes de atender às necessidades de resfriamento de grandes volumes de fluidos, como processos de fermentação, destilação e congelamento. Além disso, também são aplicáveis em supermercados, hotéis e hospitais, onde a demanda por

refrigeração é constante e intensa (Pereira, 2015).

Porém, apesar de todas essas vantagens, é importante destacar que o uso de sistemas de refrigeração por absorção ainda representa uma pequena parcela no mercado global de refrigeração. Isso se deve, em parte, à falta de conscientização sobre essa alternativa sustentável e às barreiras tecnológicas e regulatórias. Portanto, é essencial investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar e disseminar essa tecnologia (Gouvêa, 2019).

Para transformar a refrigeração sustentável em uma realidade tangível, é necessário que os governos incentivem políticas públicas que promovam a utilização de sistemas de refrigeração por absorção, incluindo incentivos fiscais e programas de capacitação. Além disso, a conscientização e educação sobre a importância da sustentabilidade na refrigeração devem ser difundidas para a sociedade como um todo (Gouvêa, 2019).

Sendo assim, a investigação sobre sistemas de refrigeração por absorção oferece uma alternativa sustentável e promissora para enfrentar os desafios da eficiência energética, viabilidade econômica e aplicações industriais e comerciais. Com investimentos em pesquisa e desenvolvimento, políticas públicas e conscientização, garante-se um futuro mais sustentável e eficiente para a refrigeração.

A refrigeração sustentável desempenha um papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas, pois é um setor importante que consome energia e que emite gases de efeito estufa significativos na atmosfera. Com o aumento das temperaturas globais, torna-se cada vez mais necessário o uso de sistemas de refrigeração eficientes e ecologicamente corretos, que não contribuam para a intensificação do aquecimento global (Ramalho, 2023).

Uma das principais contribuições da refrigeração sustentável na mitigação das mudanças climáticas é a redução das emissões de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2) e o hidrofluorcarbono (HFC). Os gases HFC são altamente potentes em relação ao aquecimento global, sendo muitas vezes usados como refrigerantes em sistemas de refrigeração convencionais. No entanto, esses gases têm um impacto negativo no ambiente, contribuindo para o aumento do efeito estufa e o consequente aquecimento do planeta. A utilização de refrigerantes naturais, como amônia (NH_3) ou dióxido de carbono (CO_2), é uma alternativa mais sustentável e com menos impacto ambiental, pois não possuem potencial de destruição da camada de ozônio e possuem menor potencial de aquecimento global (Ramalho, 2023).

Além disso, a refrigeração sustentável também contribui para a conservação de energia. A adoção de sistemas de refrigeração eficientes, com tecnologias avançadas, pode reduzir significativamente o consumo de energia elétrica. Isso é especialmente importante considerando que a demanda por refrigeração tem aumentado significativamente em todo o mundo, devido ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças nos padrões de consumo. A redução no consumo de energia também significa a redução da necessidade de geração de eletricidade, que geralmente é proveniente de fontes não renováveis, contribuindo assim para a redução das emissões de gases poluentes decorrentes da queima de combustíveis fósseis (Clavero, 2023).

Outro aspecto importante da refrigeração sustentável é a gestão adequada de resíduos. A disposição inadequada de equipamentos de refrigeração antigos e obsoletos pode liberar gases prejudiciais ao meio ambiente, como clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), que afetam a camada de ozônio e contribuem para o aquecimento global. A reciclagem adequada desses equipamentos, bem como a remoção dos gases refrigerantes de maneira segura, ajuda a evitar a liberação dessas substâncias nocivas e promovem a redução do impacto ambiental (Serenio, 2022).



Portanto, o papel da refrigeração sustentável na mitigação das mudanças climáticas é crucial. A adoção de tecnologias mais eficientes, a substituição de refrigerantes nocivos por alternativas mais ecológicas e a gestão adequada de resíduos são medidas essenciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para a sustentabilidade ambiental. O investimento em pesquisa e desenvolvimento nessa área também é fundamental para promover avanços tecnológicos e impulsionar a transição para uma refrigeração sustentável em larga escala.

Sistemas de refrigeração por absorção são dispositivos que utilizam um processo químico para remover o calor de um ambiente. Esses sistemas são amplamente utilizados em aplicações de refrigeração industrial e comercial, especialmente em locais onde a energia elétrica pode ser escassa ou cara (Santos, 2021). Ao contrário dos sistemas de refrigeração convencionais, que utilizam compressores para comprimir o refrigerante e remover o calor, os sistemas de refrigeração por absorção usam um absorvente líquido para absorver o vapor do refrigerante e remover o calor através de um processo chamado de absorção (Santos, 2021).

O funcionamento desses sistemas é baseado na interação entre dois fluidos: o refrigerante e o absorvente. O refrigerante, normalmente amônia (NH_3) ou água (H_2O), é evaporado em um trocador de calor antes de entrar em contato com o absorvente. O absorvente é uma substância química que tem a capacidade de absorver o vapor do refrigerante. Após a absorção, o absorvente carrega o refrigerante em uma solução diluída. A solução diluída passa por um processo de separação, geralmente através de um gerador de vapor, que eleva a temperatura e pressão, evaporando o refrigerante do absorvente. O vapor gerado é então condensado em um condensador, liberando calor para o ambiente externo. Após a condensação, o refrigerante líquido volta a ser bombeado para o evaporador, onde o ciclo se repete. O absorvente diluído é regenerado no gerador de vapor, onde é aquecido e pressurizado para separar o refrigerante, retornando à sua concentração original (Lima, 2018).

Esses sistemas são especialmente vantajosos em locais onde a eletricidade é limitada, já que utilizam calor em vez de eletricidade como fonte primária de energia. Isso possibilita o uso de fontes de calor como gás natural, vapor residual de processos industriais ou energia solar, tornando-os uma opção mais acessível e sustentável (Eusébio, 2017).

A eficiência energética dos sistemas de refrigeração por absorção tem se tornado uma preocupação crescente nos últimos anos, devido ao aumento da demanda por refrigeração em diversas áreas, como indústria, comércio e residências. Esses sistemas têm a capacidade de contribuir significativamente para a redução do consumo de energia, tornando-se uma opção cada vez mais atraente para os consumidores. Uma análise adequada dos sistemas de refrigeração por absorção permite compreender como eles funcionam e como podem impactar no consumo de energia. Diferentemente dos sistemas de refrigeração convencionais, que utilizam compressores, os sistemas de absorção utilizam a absorção de líquidos para realizar a troca de calor e reduzir a temperatura do ambiente (Pinto, 2014).

Esses sistemas são compostos por diversos componentes, como o evaporador, o absorvedor, o gerador e o condensador. O líquido refrigerante, ao entrar no gerador, é aquecido através de uma fonte de calor externa, o que resulta em sua vaporização. O vapor então se dirige ao absorvedor, onde é absorvido por um líquido absorvente. Esse líquido absorvente passa para o gerador, onde é regenerado e retorna ao absorvedor, reiniciando o ciclo. Os sistemas de refrigeração por absorção têm se mostrado altamente eficientes na redução do consumo de energia devido a diversos fatores. Primeiramente, eles não requerem o uso de compressores, que são motores que consomem grande quantidade de energia elétrica para comprimir o gás refrigerante. Além disso, os sistemas de absorção podem utilizar diversas fontes de calor para realizar o aquecimento do líquido refrigerante, como

gás natural, energia solar e calor residual proveniente de processos industriais (Queiroz e Costa, 2022).

Os sistemas de refrigeração por absorção funcionam com base na absorção do refrigerante em um absorvedor. Diferentemente das unidades de refrigeração mecânica, que dependem de compressão, os sistemas de absorção utilizam uma fonte de energia térmica para operar, possibilitando o uso de calores residuais, aquecimento solar ou gás. Os refrigerantes mais comuns utilizados são amônia e água (Figueredo, 2019).

Diversos estudos têm demonstrado a superioridade dos sistemas de refrigeração por absorção em termos de eficiência energética. Tais sistemas podem alcançar Coeficientes de Performance (COP) que variam de 0,5 a 1,5, enquanto os sistemas tradicionais de compressão costumam ter COPs de 2,5 a 4,0, dependendo das condições de operação (Nepin Acessórios Industriais, 2024). A Tabela 1 resume a comparação de dados de eficiência de diferentes sistemas.

Tipo de Sistema	Coeficiente de Performance (COP)	Fonte de Energia
Refrigeração por absorção	0,5 a 1,5	Calor residual, solar, gás
Refrigeração mecânica (compressores)	2,5 a 4,0	Eletricidade

Tabela 1. Comparação de Eficiência Energética entre Sistemas de Refrigeração

Fonte: Adaptado de Silva (2005)

Segundo o site Engenharia e Arquitetura (2022), a eficiência de um sistema de refrigeração por absorção é fortemente influenciada pela temperatura do calor residual utilizado. Estudos recentes mostram que quanto maior a temperatura do calor de entrada, maior a capacidade de refrigeração alcançada, como exibe-se na Figura 2. A análise apresentada demonstra que os sistemas de refrigeração por absorção, apesar de sua menor eficiência relativa em comparação aos sistemas de compressão mecânica, oferecem vantagens significativas quando utilizados em conjunto com fontes de calor residual. A capacidade de operar com temperaturas mais altas de calor residual, aliado ao potencial para uma operação mais sustentável, torna esses sistemas uma opção viável para a transição rumo a práticas de refrigeração mais ecológicas. Os dados quantitativos apresentados ressaltam a importância de considerar as condições operacionais e a fonte de energia ao selecionar o sistema de refrigeração mais adequado para diferentes aplicações (Castro, 2020).

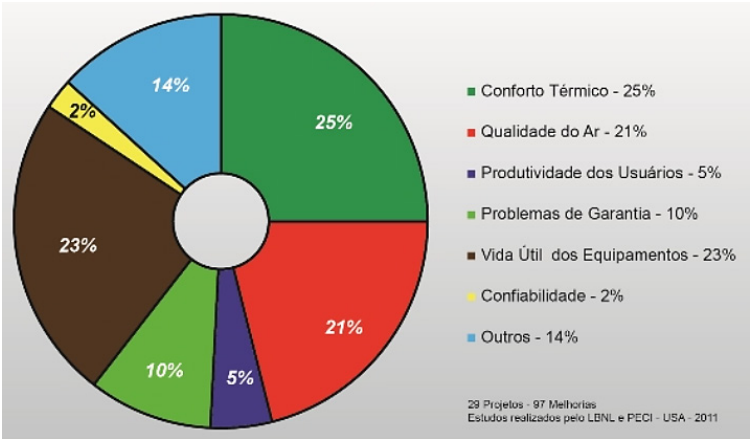


Figura 2. Impactos não energéticos das melhorias em sistemas de ar-condicionado, resultantes dos processos de retrocomissionamento.

Fonte: Engenharia e Arquitetura (2024)



A crescente preocupação com a sustentabilidade e a eficiência energética tem impulsionado a adoção de práticas inovadoras em diversos setores. Um dos avanços notáveis nesse contexto é a refrigeração por absorção, uma tecnologia que se destaca por sua capacidade de utilizar fontes de calor residual e alternativas à energia elétrica convencional. Este artigo analisa aplicações práticas de sistemas de refrigeração por absorção em indústrias químicas, hospitais e supermercados, e discute os sucessos e desafios enfrentados na sua implementação (Absolar, 2024).

A refrigeração é uma necessidade fundamental em múltiplos setores, desde a conservação de alimentos em supermercados até o controle de temperatura em ambientes hospitalares. Tradicionalmente, essa necessidade tem sido atendida por sistemas de compressão de vapor que, embora eficazes, muitas vezes dependem de altos consumos de energia elétrica e contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Em contraste, a refrigeração por absorção representa uma alternativa sustentável, utilizando calor (de diferentes fontes, incluindo energias renováveis) para criar um ciclo de refrigeração (Absolar, 2024).

Os sistemas de refrigeração por absorção operam de maneira diferente dos sistemas tradicionais. Em vez de usar um compressor, eles utilizam um absorvedor, um gerador de calor e um refrigerante que é absorvido em uma solução. Esses sistemas apresentam uma eficiência energética elevada e a capacidade de utilização de fontes de calor que, de outra forma, seriam desperdiçadas. Os refrigerantes frequentemente utilizados incluem água e amônia, que são benignos ao meio ambiente (Ferreira, 2017).

Em algumas indústrias químicas, a refrigeração por absorção tem sido implementada para aproveitar o calor residual gerado por processos químicos. Um estudo de caso em uma fábrica de produtos químicos revelou que a implementação de um sistema de refrigeração por absorção permitiu uma redução de 20% no consumo total de energia da planta. Além disso, ao utilizar o calor residual, a empresa conseguiu diminuir a pegada de carbono associada à operação, contribuindo para os objetivos de sustentabilidade corporativa (Figueroa, 2019).

Segundo Andrade (2024), embora sistemas de refrigeração por absorção tenham mostrado resultados promissores em diversas aplicações, sua implementação em ambientes reais não é isenta de desafios. As principais vantagens e os principais desafios incluem são organizadas no Quadro 1.

Sucessos possíveis	Redução de custos e emissões: a redução substancial em custos operacionais e emissões de carbono é um resultado bem documentado em diferentes aplicações.
	Sustentabilidade: o uso de fontes de calor residual e renováveis proporciona uma opção mais ecológica em comparação aos sistemas tradicionais.
Desafios de implementação	Custo inicial elevado: a alta taxa de investimento inicial pode desestimular algumas organizações, especialmente pequenas e médias empresas.
	Manutenção e operação: sistemas de refrigeração por absorção podem requerer um nível mais elevado de manutenção em comparação com sistemas convencionais, o que pode ser um desafio em locais onde o suporte técnico é escasso.
	Limitação de fornecimento de calor: a dependência de um fornecimento contínuo de calor representa uma limitação em algumas configurações industriais.

Quadro 1. Comparação de Eficiência Energética entre Sistemas de Refrigeração

Fonte: Adaptado de Andrade (2024).

Os sistemas de refrigeração por absorção oferecem uma alternativa viável e sustentável aos métodos tradicionais de refrigeração, especialmente em setores que buscam reduzir seu impacto ambiental. Analisando as aplicações práticas em indústrias químicas, hospitais e supermercados, é evidente que, embora existam desafios significativos a serem enfrentados na implementação, os benefícios em termos de eficiência energética e sustentabilidade são indiscutíveis. A pesquisa futura e o desenvolvimento de tecnologias devem se concentrar em superar as barreiras de custo e operação, promovendo uma adoção mais ampla e eficaz desses sistemas em ambientes reais (Gasparin, 2021).

Este artigo apresenta uma análise abrangente sobre os sistemas de refrigeração por absorção, focando em seu desempenho energético, viabilidade econômica e aplicações em setores industriais e comerciais. Os resultados obtidos revelam importantes insights sobre a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas em comparação com soluções tradicionais. Os resultados apresentados, discutem efetivamente as oportunidades e desafios associados à implementação de sistemas de refrigeração por absorção. Embora esses sistemas ofereçam vantagens significativas em termos de eficiência energética e viabilidade econômica, especialmente em indústrias e aplicações comerciais específicas, sua performance em condições variáveis permanece um fator crítico a ser considerado. O estudo sublinha a importância de inovações tecnológicas e estratégias de gerenciamento que possam potencializar o desempenho desses sistemas, favorecendo um futuro mais sustentável na refrigeração industrial e comercial.

3. CONCLUSÃO

A investigação sobre sistemas de refrigeração por absorção revela-se de extrema relevância na busca por alternativas sustentáveis e eficientes no contexto atual de crescente demanda por soluções que minimizem o impacto ambiental e maximizem a eficiência energética. A análise dos principais componentes deste tipo de sistema — gerador, absorvedor, evaporador e condensador — demonstrou a importância de sua interação sinérgica para garantir um desempenho eficaz e otimizado na refrigeração. Os fundamentos termodinâmicos aqui discutidos, especialmente em relação à absorção do vapor pelo líquido absorvente e a regeneração deste líquido, foram cruciais para compreender os mecanismos que conferem a esses sistemas sua eficiência energética.

Em termos de viabilidade econômica, os resultados indicam que, apesar da necessidade de investimentos iniciais significativos, os sistemas de refrigeração por absorção podem ser competitivos em diversas aplicações industriais e comerciais, especialmente quando se considera a disponibilidade de fontes de calor reutilizáveis, como vapor de processos industriais ou energia solar. O estudo reforça a ideia de que a análise de ciclo de vida, que integra custos operacionais, benefícios ambientais e o potencial de outras fontes de energia, deve ser constantemente considerada na avaliação desse tipo de tecnologia.

Ademais, a pesquisa identificou vários desafios técnicos e regulatórios que podem dificultar a implementação em larga escala desses sistemas. Questões como desenvolvimento de materiais mais eficientes, a compatibilidade com as tecnologias de refrigeração convencional já estabelecidas e as barreiras regulatórias exigem atenção e inovação contínuas. A superação desses desafios não apenas pode impulsionar a adoção dos sistemas de refrigeração por absorção, mas também contribuir para um cenário mais favorável à prática da engenharia sustentada.

Por fim, este estudo não apenas contribui para o entendimento acadêmico da refrigeração por absorção, mas também serve como um guia para profissionais da indústria,



formuladores de políticas e pesquisadores em busca de soluções sustentáveis que alinhem eficiência energética e responsabilidade ambiental no setor de refrigeração. A contínua evolução e otimização desses sistemas poderá desempenhar um papel fundamental na transição rumo a um futuro mais sustentável e resiliente.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Energia Renovável: Uma Jornada Rumo à Sustentabilidade Energética**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/https-tropicalfm99-com-br-noticia-42251-energia-renovavel-uma-jornada-rumo-a-sustentabilidade-energetica/>. Acesso em: 17 out. 2024.
- ANDRADE, N. P. **Integração energética, análise econômica e impacto ambiental no processo de metanol a olefinas (MTO)**. 2024. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2024.
- CARNEIRO, L. B. **Análise termoeconômica da tecnologia de refrigeração solar em um chiller de absorção de baixa capacidade**. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2020.
- CASTRO, Paula Cristina da Silva. **Cogeração em regime de autoconsumo-Estudo de viabilidade técnico-econômica**. 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado em Energias Sustentáveis) – Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.
- CLAVERO, Victor Diego Preato. **Planejamento energético integrado no distrito de Paracatu de Baixo em Mariana-MG**. 2023. 51 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2023.
- ENGENHARIA E ARQUITETURA. **Análise de desempenho e retrocomissionamento de sistemas**. 2022. Disponível em: <https://www.engenhariaearquitectura.com.br/2022/08/analise-de-desempenho-e-retrocomissionamento-de-sistemas>>. Acesso em: 17 out. 2024.
- EUSÉBIO, Tiago Ribeiro. **Produção combinada de calor, frio e eletricidade com energia solar concentrada em edifícios de serviços**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, 2017.
- FERREIRA, Stanley Primo. **Análise termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção de vapor com dessorção do refrigerante por energia solar**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Maracanaú, 2018.
- FERREIRA JUNIOR, Marcelo. **Energia solar aplicada em sistemas de refrigeração**. 2017. 84 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá 2017.
- FIGUEREDO, Thiago de Souza. **Análise exergoeconômica de um sistema de trigerção de energia operando sob um Ciclo de Rankine Orgânico, acoplado a um Chiller de Absorção de Simples Efeito**. 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- GASPARIN, Fernanda Bach. **Análise da viabilidade técnica de sistemas de refrigeração por absorção acionados a biomassa como alternativa para frigoríficos**. 2021. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.
- GOUVÊA, Adriana Ribeiro. **Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil**. 2019. 97 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2019.
- JALES, Yan Pablo Gomes. **Proposta teórica de implementação de um sistema agrovoltáico para a universidade Federal Rural do Semi-Árido Campus Caraúbas-RN**. 2024. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharias, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, 2024.
- LIMA, Álvaro Augusto Soares. **Análise numérica de absorventes de Chiller de absorção do tipo placa utilizando amônia/água como fluido de trabalho via CFD**. 2018. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- MARTIN, Mario José Garcia. **ISO 50001 – Gestão energética aplicada a um supermercado do interior pau-**

lista. 2017. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de Araraquara, Araraquara, 2017.

MATOS, Ana Rita Oliveira de. **Implementação de um Sistema de Monitorização de Frio em Areas de Serviço.** 2019. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.

NEPIN ACESSÓRIOS INDUSTRIAIS. **Conheça a refrigeração por absorção de vapor.** 2023. Disponível em: <https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/conheca-a-refrigeracao-por-absorcao-de-vapor/>. Acesso em: 30 maio. 2024.

PEREIRA, F. S. G. **Processos Químicos.** 2015. IFPE: Ipojuca 2015. 187 p. Apostila. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Pereira-57/publication/312298442_CHEMICAL_PROCESSES_in_portuguese_PROCESSOS_QUIMICOS/links/5878e6fb08ae4445c05d244c/CHEMICAL-PROCESSES-in-portuguese-PROCESSOS-QUIMICOS.pdf. Acesso. 09 maio. 2024.

PINTO, Carolina Ferreira. **Estudo sobre o uso de células a combustível movida a hidrogênio solar em residências.** 2014. 280 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

QUEIROZ, Matheus dos Santos; COSTA, Laura Antunes. **Desenvolvimento de um sistema de refrigeração por absorção alimentado por energia solar.** 2022. 60 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Aracruz, 2022.

RAMALHO, Marina Sofia Lopes. **Contributo para implementação da descarbonização de uma indústria alimentar.** 2023. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Alimentar) – Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Coimbra, Coimbra, 2022.

SANTOS, Jonas Laedson Marinho da Silva. **Avaliação da integração de processos de geração de energia elétrica: fontes renováveis e convencionais.** 2021. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo 2021.

SERENO, Felipe Ferreira. **Planejamento do ciclo de vida para melhorar a sustentabilidade dos gabinetes de proteção dos radares fixos rodoviários.** 2022. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Manufatura) – Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2022.

SILVA, Heber Claudius Nunes. **Metodologia técnico-financeira e modelagem de sistemas de cogeração para edificações: estudo de caso.** 2019. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, Marcelino Nascimento da. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial.** Rio de Janeiro: PROCEL, 2005. 315 p.





PROCESSO DE FABRICAÇÃO: USINAGEM EM TORNO CONVENCIONAL E CNC

MANUFACTURING PROCESS: CONVENTIONAL LATHE MACHINING AND
CNC

Joacyr Salazar de Albuquerque
Antônio Merval Machado Tavares

29

Resumo

A usinagem é um dos principais processos de fabricação utilizados para transformar materiais brutos em peças com alta precisão dimensional e excelente acabamento superficial. Dentre as máquinas mais utilizadas nesse processo, o torno se destaca pela sua capacidade de criar peças cilíndricas, cônicas e complexas. Dois tipos de tornos predominam na indústria: o torno convencional e o torno CNC (Comando Numérico Computadorizado). O presente estudo analisou os processos de usinagem em torno convencional e torno CNC, com foco em suas características técnicas, operacionais e econômicas. O objetivo foi compreender a aplicação de cada tecnologia na indústria, considerando a crescente demanda por produtos personalizados e a necessidade de otimização de processos. A metodologia incluiu a comparação de desempenho, custos de operação e manutenção dos tornos, além da análise de viabilidade para diferentes volumes de produção. Os resultados indicaram que o torno CNC oferece maior produtividade e precisão para operações em larga escala, enquanto o torno convencional se destaca pela flexibilidade em produções de baixo volume. A pesquisa concluiu que, com a evolução da Indústria 4.0, o uso de tecnologias automatizadas, como o CNC, torna-se crucial para aumentar a competitividade industrial e reduzir os tempos de produção. A escolha entre as duas tecnologias depende das exigências específicas de cada aplicação.

Palavras-chave: Usinagem. CNC. Torno Convencional. Acabamento.

Abstract

Machining is one of the main manufacturing processes used to transform raw materials into parts with high dimensional precision and excellent surface finishing. Among the machines most used in this process, the lathe stands out for its ability to create cylindrical, conical and complex parts. Two types of lathes predominate in the industry: the conventional lathe and the CNC (Computer Numerical Control) lathe. The present study analyzed the machining processes on conventional lathes and CNC lathes, focusing on their technical, operational and economic characteristics. The objective was to understand the application of each technology in the industry, considering the growing demand for personalized products and the need for process optimization. The methodology included the comparison of performance, operating and maintenance costs of the lathes, in addition to feasibility analysis for different production volumes. The results indicated that the CNC lathe offers greater productivity and precision for large-scale operations, while the conventional lathe stands out for its flexibility in low-volume production. The research concluded that, with the evolution of Industry 4.0, the use of automated technologies, such as CNC, becomes crucial to increase industrial competitiveness and reduce production times. The choice between the two technologies depends on the specific requirements of each application.

Keywords: Machining. CNC. Conventional Lathe. Finish.



1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria moderna para a produção de peças com alta precisão dimensional e acabamento superficial. Entre as máquinas utilizadas, o torno se destaca pela sua versatilidade na fabricação de peças cilíndricas, cônicas e até mesmo em formas complexas (Lopes, 2022).

Existem dois tipos principais de tornos usados na indústria: o torno convencional e o torno CNE. Enquanto o torno convencional depende diretamente da habilidade do operador, o torno CNC utiliza softwares avançados para automação e controle preciso dos movimentos, permitindo maior repetibilidade e produtividade (Marques, 2017).

A crescente demanda por produtos personalizados, aliados à necessidade de otimização de processos e redução de custos, têm impulsionado o uso de tornos CNC em substituição aos métodos tradicionais. No entanto, o torno convencional ainda desempenha um papel fundamental em operações de baixo volume ou em ambientes onde a flexibilidade e o custo inicial são considerações importante.

A relevância do estudo sobre usinagem em torno convencional e CNC se justifica pela importância desses processos para a fabricação de peças em diferentes setores da indústria, desde automotivo até aeroespacial. Com a evolução da indústria para conceitos mais avançados, como a Indústria 4.0, o uso de tecnologias de automação, como o CNC, torna-se crucial para aumentar a competitividade e reduzir tempos de produção.

O estudo do CNC (Comando Numérico Computadorizado) é fundamental para a indústria moderna, pois permite maior precisão, eficiência e automação nos processos de manufatura. Ele possibilita a produção em larga escala com alta repetibilidade, reduzindo erros humanos e otimizando o uso de materiais. Nesse contexto, surge a questão central deste estudo: Quais são as principais diferenças técnicas e operacionais entre o torno convencional e o torno CNC?

O presente estudo teve como objetivo compreender os processos de usinagem em torno convencional e torno CNC, abordando suas características técnicas e operacionais. Também foram analisados os custos de operação e manutenção, além da viabilidade da adoção de cada tipo de torno, levando em consideração aspectos econômicos e produtivos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, do tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras. Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para a busca compreendeu os últimos 10 anos.

2.2 Resultado e Discussão

As ferramentas de corte para usinagem são essenciais no processo de conformação de peças, onde são utilizadas para remover material por meio de cavacos. O cavaco é gerado pelo cisalhamento controlado da peça, sendo uma porção do material removido pela ferramenta para alcançar a forma, dimensão e acabamento desejados (Lopes, 2022). Esse processo é comum em operações como torneamento, fresamento e furação, em que a precisão e a qualidade do corte são fundamentais para o resultado final. Conforme a figura a seguir:

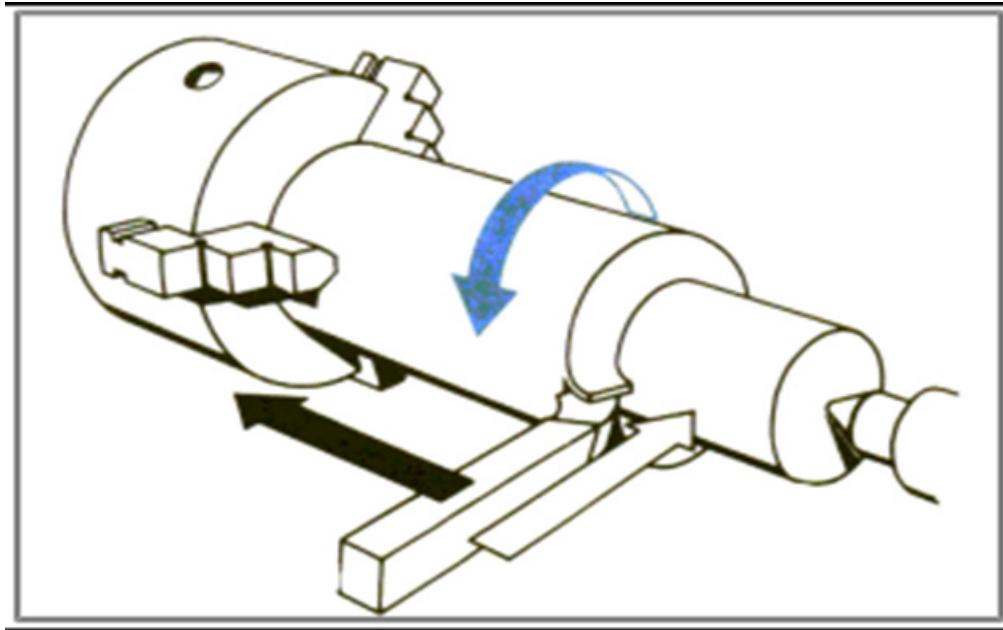


Figura 1. Torneamento.

Fonte: Marques (2017).

Segundo Gregório (2023), o torneamento é um processo realizado em máquinas-ferramenta, no qual ocorre a remoção progressiva de material da peça por meio da geração de cavacos. Esse material é cortado por uma ferramenta com um único gume cortante, que deve ser mais dura do que o material a ser usinado. Durante o processo, a ferramenta penetra na peça, que gira uniformemente ao redor do eixo “A”, possibilitando um corte contínuo e regular.

A força necessária para a remoção do cavaco é aplicada diretamente na peça, enquanto a ferramenta, presa firmemente no porta-ferramentas, resiste à reação dessa força. Esse equilíbrio entre a força aplicada e a resistência da ferramenta garante a precisão e eficiência do processo de usinagem (Lima; Rodrigues, 2023).

De acordo com Marques (2017), para a execução do processo de torneamento, é necessário considerar três movimentos essenciais entre a peça e a ferramenta. O primeiro deles é o movimento de corte, considerado o principal, que possibilita a remoção do material. Esse movimento é de rotação e é realizado pela peça, permitindo o corte contínuo e eficiente do material a ser usinado.

Conforme Moreira (2022), o segundo movimento é o de avanço, responsável por deslocar a ferramenta ao longo da superfície da peça, enquanto o terceiro, denominado movimento de penetração, determina a profundidade do corte ao empurrar a ferramenta em direção ao interior da peça. Esse movimento regula a profundidade do passe e a espessura do cavaco. Com a variação desses movimentos, bem como da posição e do formato da fer-

ramenta, é possível realizar uma ampla gama de operações de usinagem.

Segundo Lima e Rodrigues (2023), o torno é uma máquina que realiza a usinagem de superfícies de revolução, pois a peça gira enquanto a ferramenta se desloca. Ele permite a fabricação de componentes com seção circular, como eixos, polias, pinos, buchas e peças roscadas.

De acordo com Da Costa e Reis Filho (2023), além de usinar superfícies cilíndricas externas e internas, o torno é capaz de trabalhar superfícies planas, cônicas, esféricas e perfiladas, além de realizar operações como faceamento, abertura de rasgos, entalhes, ressalto, furos, recartilhamento, detalonamento, enrolamento de molas e polimento de peças.

Segundo Parente (2022), os parâmetros de usinagem consistem em valores numéricos que representam os movimentos da ferramenta ou da peça, variando conforme a situação e o tipo de máquina utilizada. Esses parâmetros são ajustados ao tipo de trabalho a ser realizado, à matéria-prima a ser usinada e ao material da ferramenta, proporcionando um processo de usinagem eficiente ao aproveitar ao máximo os recursos da máquina-ferramenta.

No entanto, Marques (2017) acrescenta que a profundidade de corte (A_p) também deve ser considerada. Outros fatores, como a área de corte, a pressão de corte, além da força e potência de corte, é igualmente importante no planejamento de um projeto. Para este estudo, os dois parâmetros principais a serem abordados são a velocidade de corte e o avanço. Segundo Medeiros Salles et al. (2023), o deslocamento pode ocorrer tanto pela peça em relação à ferramenta quanto pela ferramenta em relação à peça. Em ambos os casos, o resultado final é o corte ou o desbaste do material, proporcionando o acabamento desejado.

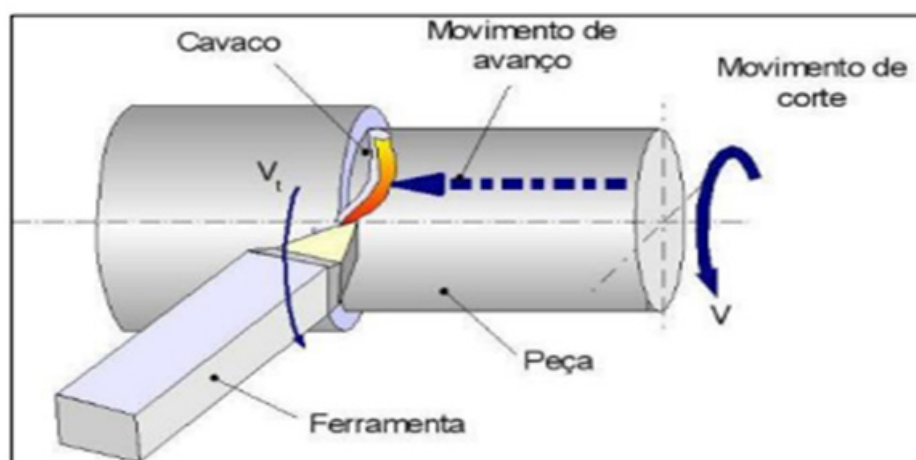


Figura 2. Velocidade de corte.

Fonte: Medeiros (2016).

A seleção da ferramenta de corte adequada depende de fatores como o tipo de material a ser usinado, a velocidade de corte e o acabamento desejado. As ferramentas são geralmente feitas de materiais de alta dureza, como aço rápido, carbonetos ou cerâmicas, que garantem durabilidade e resistência ao desgaste. Além disso, o formato da ferramenta também influencia a formação do cavaco e o controle da temperatura durante a usinagem (Lima; Rodrigues, 2023).

De acordo com Da Costa e Reis Filho (2023), ferramentas de corte são projetadas para remover material através da produção de cavacos, podendo cortar tanto materiais metálicos quanto não metálicos. Estas ferramentas são fabricadas a partir de diversos materiais,

incluindo aço carbono, cerâmica, aço rápido e metal duro, cada um oferecendo propriedades específicas que influenciam a eficiência do corte.

Além do material, as ferramentas de corte devem possuir características cruciais para garantir precisão no processo. Padrões elevados de dureza e formatos geométricos adequados, como a cunha para cortes de alta precisão, são essenciais para otimizar a performance e assegurar a qualidade do acabamento da peça usinada (Salles et al., 2023).

Anjos Júnior e Freitas (2023), o cisalhamento controlado, fundamental no processo de usinagem, ocorre quando a ferramenta penetra o material da peça, removendo as irregularidades de maneira precisa. Durante a operação, o cavaco é gerado e retirado da superfície da peça, permitindo que a ferramenta atinja o formato e acabamento especificado no projeto. O controle eficiente do processo de corte e remoção do cavaco é essencial para garantir a qualidade final do produto usinado.

TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE (V) PARA O TORNO (EM METROS POR MINUTO)					
MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE CARBONETO-METÁLICO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR RECARTILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO EXTRADURO 1060	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85
FERRO FUNDIDO GRIS	15	20	8	65	95
FERRO FUNDIDO DURO	10	15	6	30	50
BRONZE	30	40	10-25	300	380
LATÃO E COBRE	40	50	10-25	350	400
ALUMÍNIO	60	90	15-35	500	700
FIBRA E EBNITE	25	40	10-20	120	150

Tabela 1. velocidade Corte

Fonte: Medeiros (2016).

Os principais fatores que influenciam na velocidade de corte incluem a matéria-prima da ferramenta e do item a ser usinado, as condições da máquina-ferramenta, a refrigeração, além da operação a ser realizada. Para obter o melhor desempenho na velocidade de corte, é essencial que tanto a ferramenta quanto o item a ser produzido alcancem uma velocidade de corte adequada (Uchoas, 2016).

Segundo Carneiro (2016), em máquinas-ferramenta em que o movimento de corte é produzido pela rotação da ferramenta ou do item a ser fabricado, o número de rotações por minuto (n) é determinado por meio de cálculo ou com o auxílio de tabelas. Esse valor depende da velocidade de corte (V_c), que é definida pelas condições de usinagem, e do diâmetro (d) da peça ou ferramenta, sendo expresso em rotações por minuto.

2.2.1 Comandos Numéricos Computadorizados

O termo CNC (*Computer Numeric Control*) refere-se ao controle numérico computadorizado, utilizado para comandar o movimento de máquinas por meio de instruções codificadas. Esse sistema transforma os dados em sinais para controlar componentes da máquina, facilitando a produção automatizada (Lopes, 2022).





Figura 3. Velocidade de corte. Painel CNC Siemens

Fonte: Lopes (2022).

Com o interesse crescente na fabricação de componentes para aeronaves, a tecnologia CNC foi rapidamente adotada por empresas ligadas à indústria bélica nos Estados Unidos. Nos anos 1960, foi desenvolvido o G-code, um código padrão de usinagem que substituiu as linguagens específicas de cada fabricante, facilitando a integração e o uso das fresadoras controladas numericamente (Gregório, 2023).

Nos anos 1970, o aumento dos custos trabalhistas e a introdução dos primeiros programas CAD (*Computer Aided Design*) aceleraram a transição das indústrias para o uso das máquinas controladas numericamente, substituindo as ferramentas manuais por equipamentos NC. O CAD, ao permitir a criação de projetos diretamente no computador, aumentou a eficiência no processo de fabricação (Moreira, 2022).

O CNC evoluiu do controle numérico (NC), substituindo o controle baseado em hardware por um sistema mais flexível, controlado por software. Esse avanço permitiu que o programa de usinagem pudesse ser preparado tanto em softwares de projeto como diretamente na máquina, otimizando a produção industrial e permitindo maior precisão e automação (Cardoso Junior, 2024).

De acordo com Parente (2022), em termos gerais, o comando numérico computado-rizado (CNC) é um sistema eletrônico que processa informações codificadas em números, letras e símbolos, como os eixos X e Z. Com base nesses dados, a máquina realiza movimentos de operação utilizando um sistema de coordenadas cartesianas, permitindo a execução precisa de tarefas de usinagem e fabricação.

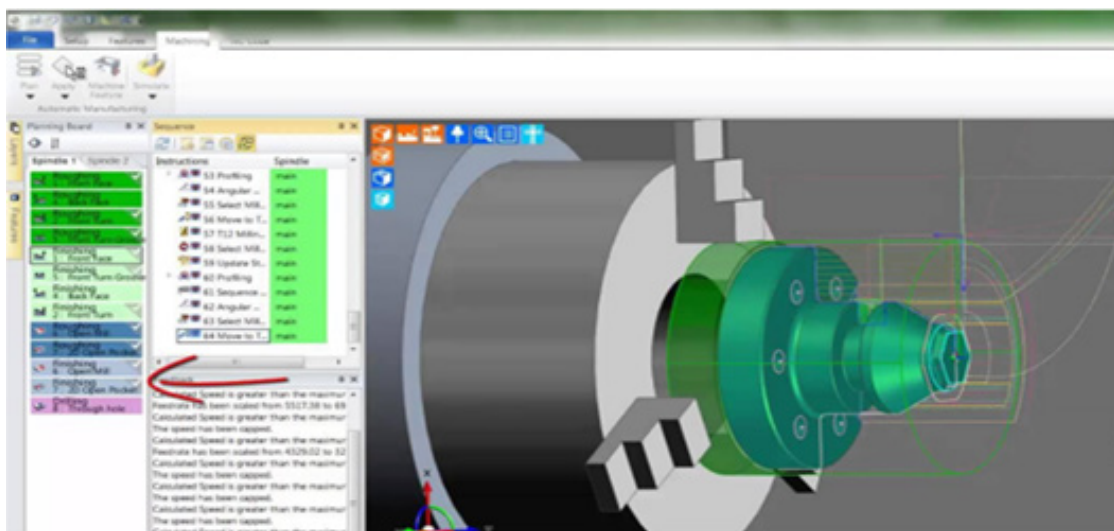


Figura 4. velocidade Corte Exemplo de programa CAD-CAM

Fonte: Adaptado Lopes (2022).

De acordo com Lopes (2022), há dois aspectos fundamentais para a programação em comandos numéricos: as coordenadas e as funções. As coordenadas são essenciais para a criação de qualquer perfil geométrico que controle as máquinas-ferramentas CNC, sendo classificadas em coordenadas absolutas, polares e incrementais. Esses elementos são indispensáveis para garantir a precisão dos movimentos durante o processo de usinagem.

De acordo com Marques (2017), a etapa mais complexa em um processo de torneamento CNC é a elaboração do programa da peça. Esse trabalho, além de ser minucioso, envolve diversos detalhes, como a geometria da peça, a escolha das ferramentas e as especificidades da máquina-ferramenta disponível. Os comandos são essenciais, já que cada um é aplicado a uma função específica no processo de usinagem.

Marques (2017) ainda destaca que a programação CNC pode ser dividida em quatro categorias principais: programação manual, programação APT, sistemas gráficos-interativos e os sistemas CAD-CAM, que são os mais utilizados atualmente. Essas formas de programação permitem um maior controle e precisão no desenvolvimento das peças, otimizando o processo produtivo.

2.2.2 Conceitos Básicos de Programação CNC

O CNC é um dispositivo eletrônico que recebe informações e envia comandos para a máquina-ferramenta, permitindo a execução de operações sem a intervenção direta do operador. A programação CNC, em um sentido restrito, refere-se à preparação dos dados de entrada, como fitas perfuradas ou discos magnéticos, que permitem ao comando mover ferramentas e dispositivos da máquina para produzir a peça desejada (Salles *et al.*, 2023).

Após essa análise, é definida a forma de fixar a peça, bem como as ferramentas, as sequências de usinagem e as condições necessárias para a operação. A elaboração de um programa CNC é um processo minucioso, pois envolve diversos fatores, como a geometria da peça, o tipo de máquina disponível e as ferramentas adequadas, além de levar em consideração os princípios de usinagem necessários para garantir que o produto final tenha as especificações desejadas (Uchoas, 2016).

De acordo com Salles et al. (2023), os quatro principais métodos de programação CNC: programação manual, programação APT, sistemas gráfico-interativos e sistemas CAD-CAM. Nos dois primeiros, o programador cria o código, que é geralmente verificado por meio de simulação ou diretamente na máquina. Esses métodos exigem um alto nível de precisão e conhecimento técnico para garantir que o código funcione corretamente.

Segundo Lima e Rodrigues (2023), nos sistemas gráfico-interativos e CAD-CAM, o programa é elaborado com o auxílio de computadores, especialmente em situações em que a geometria está completamente definida. O programador insere os dados necessários, e o sistema automatiza a geração final do código CNC, facilitando o processo e garantindo maior precisão na produção.

Segundo Marques (2023), a programação manual envolve a criação de um programa utilizando a linguagem que o Comando Numérico Computadorizado (CNC) compreende. Essa linguagem é composta por códigos formados por letras e números, que variam conforme o tipo de comando utilizado.

O programador precisa inserir parâmetros específicos para controlar o posicionamento da ferramenta, ligar e desligar a rotação, ativar ou desativar o fluido de corte, aplicar correções de raio da ferramenta, e utilizar ciclos pré-programados, como furação, rosqueamento e desbaste (Lima; Rodrigues, 2023).

Para escrever o programa, o programador utiliza um sistema de coordenadas, que pode ser absoluto ou incremental, a fim de definir o posicionamento da ferramenta com precisão. Um exemplo de comando para deslocamento linear seria: N01 G01 X200 Y400 Z000 F50, onde N01 refere-se ao número da linha, G01 ao comando de interpolação linear, e X, Y e Z representam as coordenadas finais da ferramenta, com F50 indicando a velocidade de avanço (Parente, 2022).

De acordo Marques (2017), para a execução de trajetórias circulares, são usados os comandos G02 ou G03, dependendo do sentido desejado – horário ou anti-horário. Esses comandos são seguidos pelos mesmos parâmetros utilizados no comando linear (G01), porém com a adição de informações sobre a posição do centro do arco de circunferência que a ferramenta deverá seguir.

A programação manual de peças com geometria complexa pode resultar em programas extensos e difíceis de verificar. Para facilitar esse processo, foram desenvolvidas linguagens de programação de alto nível, sendo a APT (*Automatically Programmed Tools*) uma das mais difundidas. A APT foi amplamente adotada, e diversas outras linguagens surgiram com base nela, simplificando o trabalho de programação e tornando-o mais eficiente (Gregório, 2023).

O programa APT possui quatro tipos principais de declarações. A declaração de geometria define todos os elementos geométricos usados no processo, enquanto a declaração de movimentos descreve os movimentos da ferramenta. Além disso, há as declarações do pós-processador, que especificam as características da máquina-ferramenta (Araújo Júnior; Freitas, 2024).

Os sistemas gráficos interativos são desenvolvidos para a programação CNC, utilizando a interação homem-máquina para ajustar as condições necessárias na elaboração de programas. Com a variedade de sistemas disponíveis, eles podem ser classificados pela forma de entrada de dados em dois tipos: com linguagem e sem linguagem (Cardoso Júnior, 2024).

Segundo Lima e Rodrigues (2023), os sistemas CAD/CAM representam as soluções mais avançadas para a criação de programas CNC. Eles integram a interpretação da geo-

metria das peças armazenadas em arquivos gráficos CAD e permitem a geração automática de programas CNC, com base nas informações fornecidas pelo programador.

De acordo com Salles et al. (2023), no processo de desenvolvimento de programas CNC com sistemas CAD/CAM, há passos essenciais que devem ser seguidos. Primeiramente, as superfícies a serem usinadas precisam ser preparadas adequadamente. Em seguida, é feita a seleção dos parâmetros e variáveis do processo, como tolerâncias, ferramentas e parâmetros de corte, de modo a garantir a precisão do resultado final.

Finalmente, o sistema gera automaticamente as trajetórias das ferramentas e realiza o pós-processamento, que adapta o programa às especificações da máquina CNC utilizada. Esse fluxo de trabalho integrado entre CAD e CAM traz ganhos significativos em precisão, eficiência e flexibilidade no processo de fabricação (Parente, 2022).

Segundo Marques (2017) em comparação com as máquinas convencionais, as máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) apresentam diversas diferenças, sendo a maioria delas vantagens. Entre as principais, destaca-se a flexibilidade de operação, que permite uma maior variedade de processos com menor intervenção manual. Além disso, a calibração dessas máquinas é simplificada, o que facilita o ajuste e garante maior precisão nas operações.

Outro ponto positivo é o ferramental, que tende a oferecer um melhor custo-benefício devido à sua durabilidade e eficiência. A otimização de setups também é uma vantagem significativa, pois reduz o tempo de preparação para a usinagem. Ademais, essas máquinas não dependem exclusivamente das habilidades do operador, o que permite uma produção mais uniforme e menos suscetível a falhas humanas (Da Costa; Reis Filho, 2023).

Por outro lado, as máquinas CNC também apresentam desvantagens, entre as quais se destaca o elevado custo inicial de aquisição. Esse investimento pode ser um obstáculo para pequenas empresas ou para aqueles que estão iniciando na indústria. Outro ponto crítico é o tempo necessário para a programação da máquina, que pode ser demorado e requer conhecimento especializado (Lopes, 2022).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos dados obtidos, ficou evidente que a evolução dos tornos convencionais para os tornos CNC trouxe avanços significativos para o uso de ferramentas de corte. Com a necessidade de máquinas mais avançadas, surgiram ferramentas compostas por materiais cerâmicos e metal duro, que aumentaram a capacidade de usinagem de materiais endurecidos, além de prolongar a vida útil dessas ferramentas, resultando na redução dos custos de produção.

O estudo também destacou a importância da velocidade de corte e do avanço como os parâmetros mais críticos no processo de usinagem. Quando bem ajustados, esses fatores melhoram tanto a vida útil das ferramentas quanto a produtividade e a precisão do processo. Nos tornos CNC, a facilidade de controle desses parâmetros garante maior eficiência e minimiza o desgaste precoce das ferramentas.

Outro ponto analisado foi a superioridade do CNC na precisão e agilidade de fabricação, sobretudo em processos repetitivos. A possibilidade de programar e simular operações antes da produção proporciona maior segurança e controle, eliminando etapas como a retificação e aumentando a qualidade do produto final. No entanto, o alto custo inicial e a necessidade de operadores qualificados são desafios a serem considerados.



A transição para o CNC oferece benefícios significativos em termos de precisão, agilidade e redução de custos a longo prazo. Ainda assim, o uso de tornos convencionais pode ser vantajoso em operações específicas, onde flexibilidade e menor custo de investimento inicial são prioridades. Ambos os métodos possuem valor e aplicabilidade, dependendo das necessidades produtivas de cada indústria.

REFERÊNCIAS

- ANJOS JÚNIOR, Genilson Ferreira dos; FREITAS, Renata Lorrany Aparecida. **Projeto mecânico de um mini torno CNC**. 2023. 70 f. il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Automotiva) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.
- CARDOSO JÚNIOR, Edinaldo Serra. **Desenvolvimento de máquina CNC para a fabricação de encostos anatômicos e personalizados em blocos de espuma**. 2024.
- CARNEIRO, Vinícius Guzmàn Pereira. **Integração entre CAD/CAM e geração de programa para máquina CNC**. 2016. 219 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- DA COSTA, Carlos Fernando Alves; REIS FILHO, Ramílio Ramalho. PROCESSO DE USINAGEM: um estudo sobre desgaste de ferramenta de corte em torno CNC. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 2, p. 657-665, 2023.
- GREGÓRIO, Felipe et al. CONVERSÃO DE TORNO CONVENCIONAL PARA CNC. **Anais do Encontro de Iniciação Científica das Faculdades Integradas de Jaú**, v. 20, 2023.
- LIMA, Thaynan Alves Salviano de; RODRIGUES, Victor Marques. **Should cost aplicado na fabricação de parafusos sextavados M10, pelos processos de metalurgia do pó, conformação mecânica e usinagem CNC**. 2023.
- LOPES, Mariana Figueiredo. **Resistência adesiva entre resinas acrílicas CAD/CAM e resinas de rebasamento submetidas a envelhecimento químico**. 2022. Tese de Doutorado.
- MARQUES, Joele dos Santos. **Projeto do trabalho em um torno cnc: da análise à sugestão de adequações das condições de saúde e segurança**. 2017.
- MOREIRA, André Pimentel. **Controle Numérico Computadorizado: Fundamentos e Programação**. André Pimentel Moreira, 2022.
- PARENTE, Rui Daniel Correia. **Caracterização de tornos CNC multi-eixos e fabrico de peças complexas na empresa RRMP**. 2022. Tese de Doutorado.
- SALLES, Rodrigo Araujo et al. Aprendizado de máquinas industriais utilizando Realidade Virtual. **Redin-Revista Educacional Interdisciplinar**, v. 12, n. 2, p. 19-34, 2023.
- UCHOAS, Ricardo Camargo. **Construção de uma ferramenta de apoio à programação em um torno CNC**. 2016. 60 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.



THE EVOLUTION OF HYBRID ENGINES IN THE AUTOMOTIVE SECTOR

30

Resumo

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a eficiência energética tem levado ao desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias inovadoras no setor automotivo, com destaque para os motores híbridos. Esses motores, que combinam um motor a combustão interna com um motor elétrico, oferecem uma alternativa viável para a redução de emissões de gases poluentes e o consumo de combustíveis fósseis. O presente artigo, classificado como uma revisão de literatura, explora a evolução dos motores híbridos, destacando os principais desafios e oportunidades que essa tecnologia apresenta para a indústria automotiva. O estudo examina os avanços tecnológicos dos motores híbridos nas últimas décadas e as implicações desses avanços para o mercado global. Além disso, aborda as barreiras econômicas, tecnológicas e estruturais que dificultam a adoção em larga escala dos veículos híbridos. A metodologia empregada inclui uma análise aprofundada de fontes secundárias e estudos de caso que ilustram as tendências e inovações no campo dos motores híbridos. A pesquisa revela que, embora os motores híbridos ofereçam uma solução intermediária promissora para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e da dependência de combustíveis fósseis, a sua adoção massiva ainda é limitada por diversos obstáculos.

Palavras-chave: Veículos híbridos. Eficiência energética. Tecnologia automotiva. Sustentabilidade.

Abstract

The growing concern for environmental sustainability and energy efficiency has led to the development and improvement of innovative technologies in the automotive sector, with emphasis on hybrid engines. These engines, which combine an internal combustion engine with an electric motor, offer a viable alternative for reducing pollutant gas emissions and the consumption of fossil fuels. This article, classified as a literature review, explores the evolution of hybrid engines, highlighting the main challenges and opportunities that this technology presents to the automotive industry. The study examines the technological advances of hybrid engines in recent decades and the implications of these advances for the global market. In addition, it addresses the economic, technological and structural barriers that hinder the large-scale adoption of hybrid vehicles. The methodology employed includes an in-depth analysis of secondary sources and case studies that illustrate trends and innovations in the field of hybrid engines. The research reveals that, although hybrid engines offer a promising intermediate solution to address the challenges of climate change and dependence on fossil fuels, their massive adoption is still limited by several obstacles.

Keywords: Hybrid vehicles. Energy efficiency. Automotive technology. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a busca por eficiência energética têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras no setor automotivo. Uma dessas inovações são os motores híbridos, que combinam um motor a combustão interna com um motor elétrico, proporcionando uma alternativa viável para a redução de emissões de gases poluentes e o consumo de combustíveis fósseis. Nos últimos anos, os motores híbridos têm evoluído significativamente, trazendo novos desafios e oportunidades para a indústria automotiva.

A adoção de veículos com motores híbridos está se expandindo globalmente, à medida que consumidores e governos buscam soluções para mitigar os impactos ambientais das emissões de carbono. Além disso, os avanços tecnológicos permitem maior autonomia, desempenho e eficiência energética desses motores, tornando-os cada vez mais competitivos no mercado automotivo.

A transição para tecnologias mais limpas e sustentáveis no setor de transporte é essencial para enfrentar os desafios globais das mudanças climáticas e da dependência de combustíveis fósseis. Os motores híbridos apresentam-se como uma solução intermediária viável, combinando eficiência energética com menor impacto ambiental. Apesar disso, a adoção massiva dessa tecnologia ainda enfrenta barreiras econômicas, tecnológicas e estruturais.

Este estudo se justifica pela necessidade de uma análise aprofundada sobre como a indústria pode superar esses desafios, além de identificar oportunidades de inovação e crescimento econômico dentro do setor automotivo, promovendo um futuro mais sustentável. Desta forma, surge o seguinte questionamento: Quais são os principais desafios enfrentados pela indústria automotiva na evolução e adoção de motores híbridos, e como essa tecnologia pode gerar novas oportunidades no mercado automotivo global?

O objetivo geral é compreender a evolução dos motores híbridos no setor automotivo, destacando os principais desafios e oportunidades oferecidos por essa tecnologia para a indústria. Para isso, é essencial identificar os avanços tecnológicos significativos relacionados aos motores híbridos nas últimas décadas e entender as oportunidades de mercado, bem como os desafios enfrentados pela indústria automotiva na adoção e expansão de veículos com motores híbridos.

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, do tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras. Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para a busca compreendeu os últimos 10 anos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Resultados e Discussão

O conceito de veículos híbridos, que utilizam duas ou mais fontes de energia para pro-



pulsão, não é recente. Em 1899, Ferdinand Porsche iniciou a produção do primeiro veículo elétrico com motor de ciclo Otto. No entanto, na época, os veículos elétricos enfrentavam dificuldades significativas, como limitações no armazenamento de energia em baterias, o que contribuiu para a falta de sucesso e a interrupção do desenvolvimento desses veículos (Coelho, 2018).

Com o tempo, a crescente preocupação com a saúde ambiental, a necessidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono e os custos relacionados aos combustíveis impulsionaram o investimento em motores elétricos. A evolução tecnológica na acumulação e transformação da energia elétrica tem gerado um aumento no interesse pela propulsão elétrica nos automóveis. A figura 1 a seguir mostra o motor híbrido (Denton, 2018).



Figura 1. Motor Híbrido

Fonte: Adaptado Ferreira (2018).

A principal característica dos motores híbridos é a integração de duas tecnologias distintas, com o motor a combustão interna e o motor elétrico trabalhando em conjunto. Um custo social potencial da adoção de veículos elétricos é o aumento da demanda sobre o sistema elétrico e redes de transmissão, que pode exigir investimentos adicionais (Carvalho *et al.*, 2020).

Conforme Denton (2018), os carros híbridos combinam diferentes sistemas de propulsão, geralmente um motor de combustão interna e um motor elétrico, proporcionando uma alternativa eficiente em relação aos veículos convencionais. O motor a combustão interna em veículos híbridos é frequentemente projetado para operar com ciclos Otto ou Atkinson. O motor elétrico, por sua vez, é alimentado por baterias que são recarregadas através da regeneração de energia durante as frenagens e desacelerações do veículo.

Segundo Denton (2018), a importância de tecnologias como a recuperação de energia cinética e a minimização de perdas por fricção para otimizar a eficiência dos motores híbridos. Essas tecnologias contribuem para uma melhor utilização da energia e uma redução significativa no consumo de combustível.

Além disso, o ciclo Miller tem sido objeto de análise em relação ao desempenho e às emissões de motores híbridos. O ciclo Miller proporciona uma melhora significativa na eficiência do motor e na redução das emissões poluentes quando comparado aos motores convencionais com ciclo Otto. Esse avanço tecnológico contribui para um desempenho

ambiental mais favorável e um menor impacto ecológico dos veículos híbridos (Vonbun, 2015).

2.2.1 Tipos de veículos híbridos

De acordo com Brunetti (2018), os carros MHEV (*Mild Hybrid Electric Vehicle*), ou híbridos leves, são equipados com um motor de combustão interna tradicional, complementado por um pequeno motor elétrico. Este motor elétrico não é capaz de propulsionar o veículo por si só, mas serve para auxiliar o motor a gasolina.

Na maioria dos automóveis híbridos leves, o sistema não utiliza um motor elétrico independente, mas sim uma versão mais robusta do alternador e do motor de partida, integrados em uma única peça alimentada por um sistema de 48V, ou às vezes 12V, como em carros convencionais. Este sistema, conhecido como *Belt Starter Generator* (BSG) ou gerador de partida de correia, conecta o motor elétrico ao virabrequim do motor convencional por meio de uma correia, permitindo que o veículo não se mova apenas com eletricidade (Passos, 2023).

De acordo com Passos (2023), a principal vantagem do BSG é sua capacidade de desligar o motor durante momentos de baixa demanda, como em uma descida, e religá-lo imediatamente, melhorando o consumo de combustível. Dependendo do fabricante, o sistema também pode proporcionar um aumento temporário de torque para melhorar a arrancada do veículo, exatamente quando o motor a combustão consome mais combustível.

De acordo com Brunetti (2018), os veículos PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) representam um avanço em relação aos híbridos convencionais. Esses carros possuem uma bateria de maior capacidade que pode ser recarregada por meio de uma tomada elétrica externa.

Como resultado, os PHEVs são capazes de percorrer distâncias maiores em modo totalmente elétrico antes de utilizar o motor a gasolina. Assim como os outros tipos de híbridos, os PHEVs são uma excelente opção para quem deseja reduzir o consumo de combustível e as emissões durante os deslocamentos diários (Brunetti, 2018).

Os motores elétricos, ao fornecerem potência adicional aos motores a combustão, possibilitam a redução do tamanho e aumento da eficiência energética destes motores, uma vez que podem compensar a demanda de potência quando necessário. Vonbun (2015) destacou que algumas tecnologias associadas aos híbridos, como a direção assistida eletricamente e o ar-condicionado alimentado pelas baterias, além do sistema start-stop, que desliga o motor a combustão quando o veículo está parado, contribuem para a maior eficiência dos híbridos em comparação com veículos convencionais.

Thiellet (2019) observou que, apesar dos ganhos econômicos proporcionados pelos veículos híbridos, é crucial melhorar a durabilidade das baterias. O artigo enfatizou a superioridade dos veículos PHEVs em relação aos veículos movidos a célula de hidrogênio, especialmente no que tange à eficiência energética e às dificuldades associadas à distribuição de hidrogênio.

Carvalho et al. (2020) realizaram uma classificação dos veículos elétricos em três grandes grupos. O primeiro grupo foca na análise da aceitação dos veículos híbridos e elétricos do ponto de vista do consumidor. Este grupo de estudos assume que a solução para problemas ambientais e a limitação dos recursos naturais passa pela adoção de veículos elétricos, com os híbridos servindo como um estágio intermediário entre as tecnologias

tradicionais e as novas.

Essas análises oferecem uma visão abrangente das vantagens e desafios associados aos veículos híbridos e elétricos, destacando tanto os benefícios em termos de eficiência e redução de emissões quanto as áreas que necessitam de desenvolvimento, como a durabilidade das baterias e a infraestrutura necessária para suportar novas tecnologias (Carvalho *et al.*, 2020).

As análises financeiras sobre a viabilidade da aquisição de veículos elétricos ou híbridos frequentemente se concentram na economia de combustível e na redução das despesas totais por distância percorrida, do ponto de vista dos consumidores. Esses estudos frequentemente consideram incentivos e subsídios governamentais, embora nem sempre incluam uma avaliação dos impactos sociais (Lucena, 2018).

Vonbun (2015) realizou uma análise comparativa dos custos e benefícios entre veículos híbridos plug-in (PHEVs), híbridos convencionais (HEVs) e veículos com motor a combustão pura. A avaliação considerou o custo total de propriedade ao longo da vida útil dos veículos, dividindo-a em dois cenários: curto e longo prazo. No curto prazo, os HEVs mostraram-se economicamente vantajosos em comparação com os veículos convencionais após aproximadamente uma década de uso, enquanto os PHEVs nunca alcançaram custos inferiores aos dos veículos convencionais.

No cenário de longo prazo, os HEVs se tornaram mais econômicos do que os veículos convencionais após quatro anos de uso. Por outro lado, os PHEVs apresentaram uma vantagem econômica em relação aos HEVs somente após doze anos de utilização. Conforme Freitas e Medeiros (2021) concluiu que a análise de custo-benefício dos PHEVs está fortemente relacionada à autonomia dos veículos, indicando que a viabilidade financeira dos PHEVs melhora com o aumento da autonomia.

2.2.2 Avanços Tecnológicos No Conceito De Automóveis Híbridos

A tecnologia dos automóveis híbridos tem evoluído significativamente desde o primeiro modelo desenvolvido por Porsche, que utilizava dois motores elétricos nas rodas dianteiras para alcançar velocidades superiores, oferecendo um diferencial em relação aos veículos convencionais da época (Hybridcars, 2017).

Inicialmente, devido à complexidade e ao custo elevado dessa nova tecnologia, os fabricantes enfrentaram dificuldades para estabelecer uma linha de produção em massa que gerasse lucros comparáveis aos dos automóveis convencionais. Como resultado, muitos fabricantes perderam o interesse em veículos híbridos, considerando-os economicamente inviáveis (Vaz; Barros; Castro, 2015).

O Toyota Prius 2017, por exemplo, vem equipado com diversas tecnologias avançadas, incluindo os freios regenerativos. Esses freios têm a função de reaproveitar a energia gerada durante o processo de frenagem para recarregar a bateria que alimenta o sistema elétrico do veículo, conforme ilustrado na Figura 2 (Lenz, 2017).

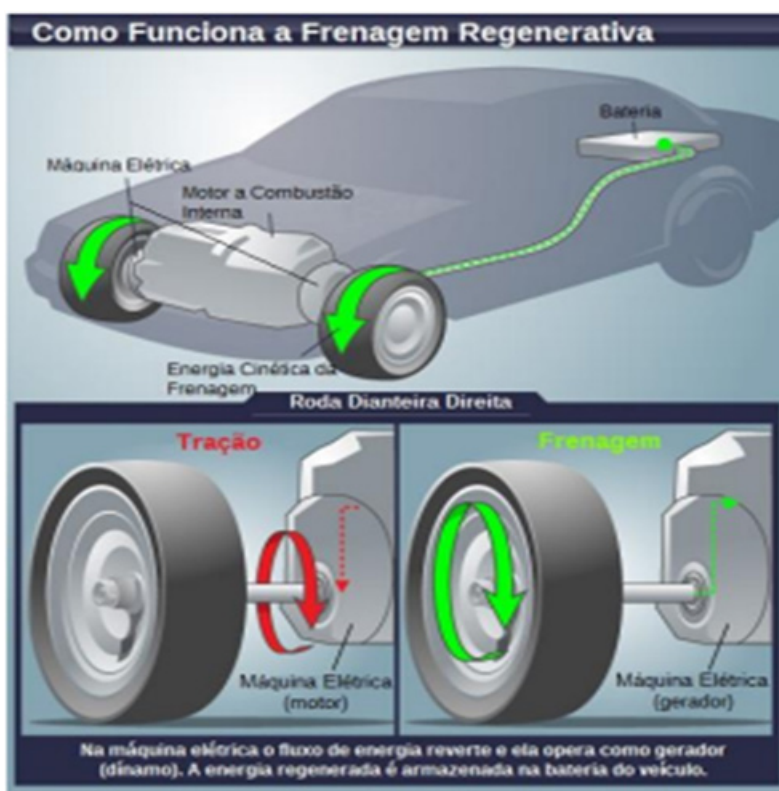


Figura 2. Freio regenerativo.

Fonte: Adaptado Lenz (2017).

O conceito de automóveis híbridos começou a ganhar relevância novamente durante a crise do petróleo, quando o preço da gasolina atingiu níveis elevados e as vendas de veículos convencionais caíram. Essa situação fez com que os veículos híbridos, com sua proposta de menor consumo de combustível, se tornassem uma alternativa atraente para os fabricantes (Hybridcars, 2017).

De acordo com Toyota é a líder em vendas no segmento de veículos híbridos, refletindo a crescente aceitação e demanda por essa tecnologia. A evolução contínua dos veículos híbridos, combinada com a crescente conscientização sobre a eficiência de combustível e a redução de emissões, contribui para o sucesso da Toyota e de outras montadoras no mercado de automóveis híbridos (Toyota, 2022).

De acordo com Ferraz (2023), o panorama nacional de motores híbridos revela um total de 3.315.312 veículos híbridos e elétricos em circulação. Dentre esses, 1.989.187 (60%) são veículos híbridos plug-in e 1.326.125 (40%) são veículos totalmente elétricos (Coelho, 2018). A frota nacional percorre uma distância total de aproximadamente 41.772.200 km ao longo de um ano. Com base nessa informação, é possível estimar o consumo elétrico de cada tipo de veículo, conforme ilustrado na figura 3 a seguir.

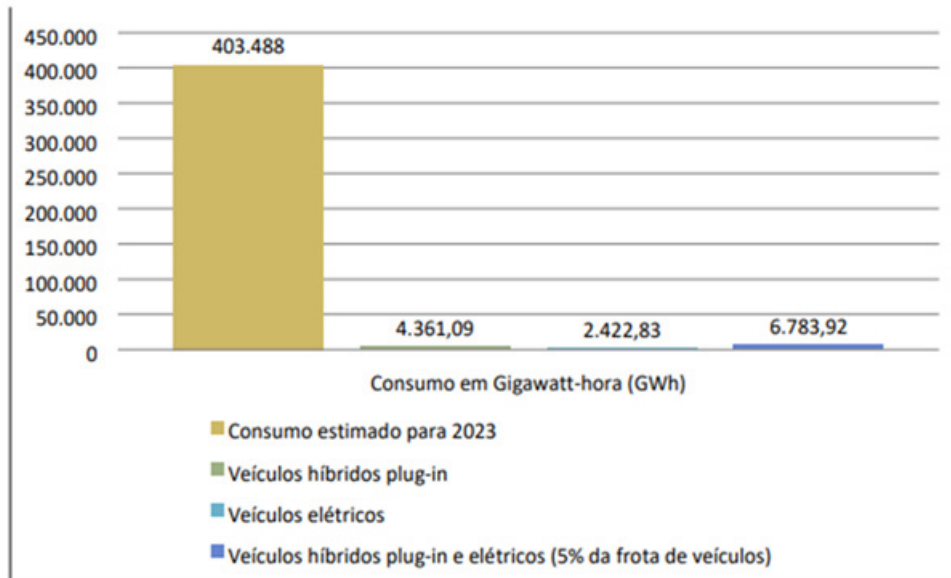


Figura 3. Consumo elétrico total e veicular estimado no cenário 2023.

Fonte: Adaptado Coelho (2018).

Em 2028, o cenário nacional para veículos híbridos e elétricos prevê uma frota total de 20.272.694 veículos. Dentre esses, 8.109.077 (40%) serão veículos híbridos plug-in e 12.163.617 (60%) serão veículos totalmente elétricos. A distância total percorrida por essa frota ao longo de um ano é estimada em 260.080.744.400 km, o que permite calcular o consumo elétrico para cada tipo de veículo, conforme ilustrado na figura 4 a seguir (Vaz; Barros; Castro, 2015).

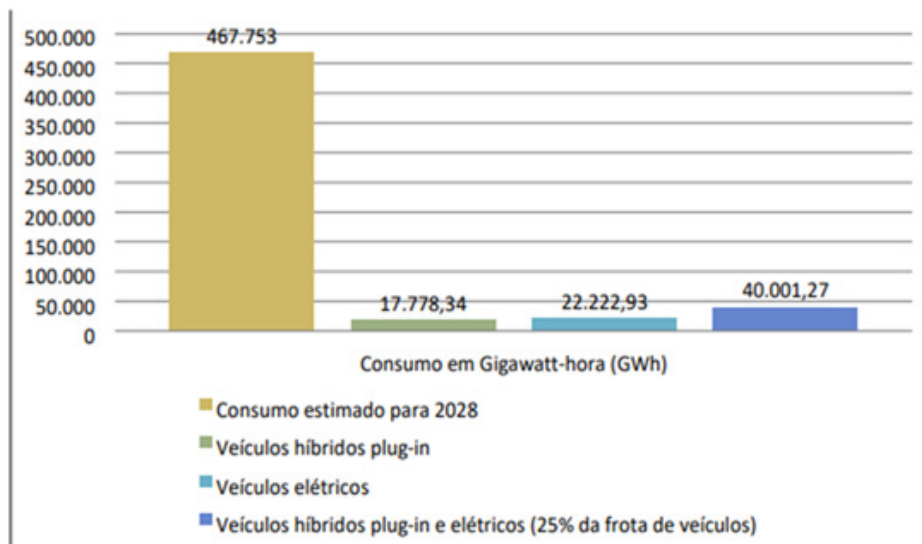


Figura 4. Consumo elétrico total e veicular estimado no cenário 2028.

Fonte: Adaptado Coelho (2018).

Com base na projeção para 2028, os veículos híbridos apresentarão um consumo de aproximadamente 17.778 GWh, enquanto os veículos totalmente elétricos consumirão cerca de 22.223 GWh. O impacto total de consumo elétrico será, portanto, de 40.001 GWh (Vaz; Barros; Castro, 2015).

O Cross 1.8 XRX Híbrido combina um motor a combustão interna com um motor elétrico, visando otimizar a eficiência de combustível e reduzir as emissões de poluentes. De

acordo com o estudo de Ferreira (2018), este modelo utiliza a tecnologia híbrida para melhorar a economia de combustível, proporcionando um equilíbrio entre desempenho e eficiência. O motor a gasolina, que atua como principal fonte de propulsão, é complementado pelo motor elétrico para reduzir o consumo e as emissões durante a condução (Ferraz, 2023).

De acordo com Ferraz (2023), além disso, o Cross 1.8 XRX Híbrido é equipado com um sistema de bateria que armazena a energia elétrica gerada durante a frenagem e desaceleração, permitindo a recarga do motor elétrico. Segundo a análise de Freitas e Medeiros (2021), essa tecnologia de recuperação de energia contribui para a eficiência energética do veículo, possibilitando um melhor aproveitamento da energia e reduzindo a necessidade de recarga externa.

A combinação desses dois tipos de motores no Cross 1.8 XRX Híbrido resulta em uma significativa melhoria no consumo de combustível e nas emissões de CO₂. Conforme relatado por Coelho (2018), a aplicação da tecnologia híbrida neste modelo oferece uma solução eficaz para motoristas que buscam reduzir os custos com combustível e minimizar o impacto ambiental. A figura 5 a seguir temos o gráfico a velocidade do veículo híbrido em relação ao tempo.

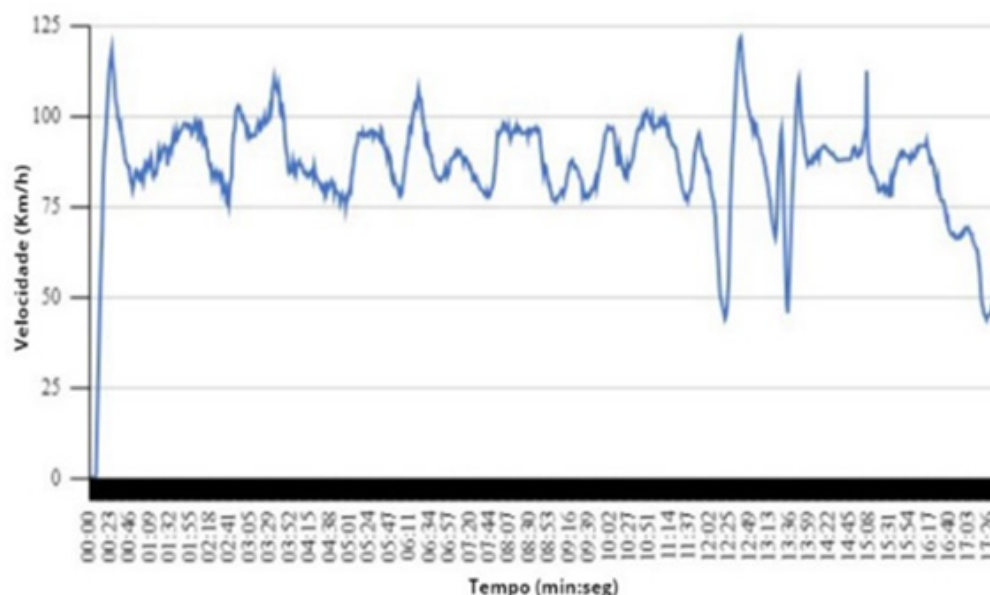


Figura 5. Estrada no Cross 1.8 XRX Híbrido

Fonte: Adaptado Ferreira (2018).

Na versão híbrida do Cross, o desempenho registrado foi inferior ao esperado, com o carro alcançando a velocidade de 0 a 100 km/h em 13,02 segundos. Apesar de contar com um motor a combustão combinado com motores elétricos, o modelo híbrido apresenta uma potência combinada de apenas 122 cv, em contraste com os 177 cv da versão do Corolla Cross sem eletrificação, conforme indicado no manual do veículo Toyota (Toyota, 2022).

No mercado nacional, a aceitação plena de veículos híbridos é prejudicada pelo fator predominante do preço, que limita a viabilidade desses produtos para uma grande parcela da população. Segundo Coelho (2018), a alta tecnologia embarcada nesses veículos torna sua operacionalização difícil para muitos consumidores brasileiros, que podem não estar familiarizados com os sistemas avançados presentes nos carros híbridos. A preocupação com o custo também reflete uma barreira significativa para a adoção generalizada desses

veículos no país.

Outro aspecto desfavorável é o perfil demográfico dos compradores de veículos híbridos, que tende a ser mais restrito. A elevada tecnologia desses automóveis limita sua operação a um público que geralmente possui um nível de familiaridade com tecnologias avançadas (Vaz; Barros; Castro, 2015).

Conforme Ferraz (2023), a maioria dos compradores potencialmente interessados nesses veículos são pessoas com idade média acima dos 40 anos, predominantemente mulheres ou idosas, o que restringe ainda mais o mercado para esses veículos no Brasil.

A inovação tecnológica não apenas introduz novidades em nossa sociedade, mas também busca resolver problemas decorrentes de projetos anteriores. A tecnologia atualmente disponível tem avançado significativamente, melhorando a qualidade de vida e promovendo benefícios ambientais (Thiellet, 2019).

Segundo Thiellet, (2019), o alto custo dos veículos híbridos é uma barreira significativa para as classes baixas e médias, que frequentemente não têm acesso a esses modelos. É essencial que o governo implemente políticas e ações que facilitem o acesso da população a esses veículos, não apenas beneficiando os proprietários individuais, mas também contribuindo para a redução da poluição ambiental e a melhoria da qualidade do ar para toda a sociedade.

Conforme Ferraz (2023), os veículos híbridos se destacam como uma alternativa eficiente em termos logísticos, oferecendo maior autonomia e um consumo reduzido em comparação com os veículos convencionais. Essa eficiência pode representar um aumento na capacidade competitiva das empresas e promover um desenvolvimento econômico sustentável em nível societal.

De acordo Coelho (2018), com é possível afirmar que os veículos híbridos possuem um potencial significativo para impulsionar tanto a eficiência logística quanto o desenvolvimento econômico sustentável, beneficiando empresas e a sociedade como um todo.

A evolução dos motores híbridos no setor automotivo tem sido marcada por avanços significativos em termos de tecnologia e eficiência. A integração de motores a combustão com motores elétricos proporcionou uma melhora na eficiência energética e na redução das emissões de poluentes. No entanto, a análise revelou que, apesar dos progressos, a alta complexidade e o custo elevado desses sistemas ainda representam desafios consideráveis para a adoção em larga escala (Ferreira, 2018).

Além disso, a aceitação de veículos híbridos é influenciada por fatores econômicos e tecnológicos. O estudo mostrou que, enquanto a tecnologia híbrida oferece benefícios substanciais em termos de eficiência e sustentabilidade, o alto custo inicial e a necessidade de infraestrutura adequada para suporte e manutenção ainda limitam sua penetração no mercado, especialmente em países com economias emergentes (Denton, 2018).

Por outro lado, as oportunidades para o setor são promissoras. A contínua inovação tecnológica e o crescente suporte governamental para veículos sustentáveis podem facilitar a redução dos custos e melhorar a acessibilidade. A expansão das políticas de incentivos e subsídios, além do avanço na infraestrutura de recarga e manutenção, pode acelerar a adoção dos veículos híbridos e maximizar seus benefícios ambientais e econômicos (Carvalho *et al.*, 2020)

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado sobre motores híbridos no setor automotivo conseguiu, de maneira satisfatória, resolver o problema inicialmente proposto, ampliando a compreensão sobre o papel desses motores na busca por maior eficiência energética e redução de emissões. A análise aprofundada das tecnologias híbridas e de seu impacto no mercado automotivo demonstrou que esses motores são uma alternativa viável para enfrentar os desafios ambientais e econômicos do setor.

O estudo descreveu o funcionamento e as tecnologias dos motores híbridos, como também analisou seus impactos ambientais e econômicos, oferecendo uma visão crítica sobre os desafios e benefícios. O método utilizado, baseado na revisão de literatura, foi adequado para a síntese e análise de informações de diversas fontes, permitindo uma compreensão global do tema. A bibliografia selecionada atendeu às expectativas, proporcionando uma base teórica sólida e abrangente, com autores relevantes e atuais no campo dos motores híbridos.

Após a leitura, análise, comparação e síntese de diferentes autores, ficou claro que os motores híbridos representam uma solução intermediária importante rumo à eletrificação total dos veículos. No entanto, é necessário continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento para superar os desafios identificados, como o custo elevado de produção e a necessidade de melhorias na infraestrutura de recarga elétrica. A expansão dos incentivos governamentais também é crucial para estimular tanto os consumidores quanto os fabricantes a adotarem essa tecnologia de forma mais ampla.

Como recomendação, sugere-se o desenvolvimento de políticas públicas que promovam a infraestrutura necessária para a utilização de veículos híbridos e elétricos, como estações de recarga acessíveis e incentivos fiscais. Além disso, seria interessante fomentar a pesquisa em soluções tecnológicas que tornem os motores híbridos mais acessíveis e eficientes. Também é recomendável que futuras pesquisas explorem a viabilidade de novas tecnologias, como baterias de maior capacidade e sistemas de regeneração mais eficientes, ampliando o horizonte das possibilidades no setor automotivo.

REFERÊNCIAS

- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna-Vol. 1.** [S.l.]: Editora Blucher, 2018.
- CARVALHO, Y. de A.; GONÇALVES, L. M.; CIPRIANO, R. Z.; MACEDO, F. A. S.; SANTOS, L. **Viabilidade econômica dos veículos híbridos:** Uma análise comparada baseada no payback. *Gestão da Produção em Foco* Volume 44, p. 6, 2020.
- COELHO, Luis Marques. **Veículos híbridos: funcionamento e aspectos essenciais de motores como alternativa viável.** Scipione, Campinas, 2018.
- DENTON, Tom. **Veículos elétricos e híbridos.** Editora Blucher, 2018.
- FERRAZ, Matheus Cavalcanti de Moura. **Comparação entre um automóvel híbrido e um convencional, relacionando aspectos cinemáticos, energéticos e financeiros.** 2023. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- FERREIRA, Rodolfo de Oliveira. **Vantagens Do Automóvel Híbrido Na Sociedade Moderna Em Relação Aos Automóveis Convencionais.** 2017. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – (Centro Universitário Santo André Campus II, Santo André, 2018).
- FREITAS, Luiz Filipe Silva; MEDEIROS, K. Sustentabilidade veicular: o uso de veículos elétricos e híbridos/ Vehicle Sustainability: The Use of Electric and Hybrid Vehicles. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 84614-84634, 2021.



HYBRIDCARS. **História do automóvel híbrido** Disponível em: <http://www.hybridcars.com>. Acesso em: 5 de ago. 2024.

LENZ, André Luís. **Freio Regenerativo**. (Sistema de Recuperação de Energia Cinética), Disponível em: <http://www.automoveiseletricos.blogspot.com.br>. Acesso em: 8 ago. 2024.

LUCENA. **Os prós e contras dos carros elétricos**. 2018. Online. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/os-pros-e-contras-do-carro-eletrico>. Acesso em: 8 ago. 2024.

PASSOS. **Pleno, 48V e plug-in: os diferentes tipos de carros híbridos e elétricos**. 2023. Online. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/carros-eletricos/pleno-48v-e-plug-in-os-diferentes-tipos-de-carros-hibridos-e-eletricos>. Acesso em: 8 ago. 2024.

THIELLET, L. E. V. **Análise de viabilidade econômica de um automóvel híbrido**. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

TOYOTA. **Manual do Proprietário Corolla Cross**. [S.l.]: Toyota, 2022.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. d. **Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2015.

VONBUN, C. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura**. Texto para Discussão, 2015.



ESTUDO SOBRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ARCO ELÉTRICO: TIG E MIG/MAG

STUDY ON ELECTRIC ARC WELDING PROCESSES: TIG AND MIG/MAG

Vinicius Moura
Antônio Merval Machado Tavares

31

Resumo

Este estudo tem como foco a análise dos processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), amplamente utilizados na fabricação de estruturas metálicas em setores como a indústria automotiva, construção civil e aeroespacial. A evolução da soldagem ao longo dos anos, desde métodos manuais até sistemas automatizados, reflete a crescente demanda por precisão, resistência e eficiência nos processos de fabricação. O objetivo principal da pesquisa é compreender as características e aplicações dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG, oferecendo diretrizes para a escolha adequada de cada método. O estudo visa analisar tecnicamente ambos os processos, considerando sua eficiência, precisão e qualidade no contexto de diferentes aplicações industriais. A metodologia adotada incluiu uma revisão de literatura técnica e estudos comparativos, avaliando aspectos como a qualidade do acabamento, a velocidade de aplicação e a adequação a materiais específicos. Os resultados mostraram que o processo TIG é ideal para soldas que exigem alta qualidade e precisão, sendo amplamente utilizado nas indústrias aeroespacial e eletrônica. Por outro lado, o processo MIG/MAG, com sua maior velocidade e facilidade de operação, é preferido em produções de larga escala, como nas indústrias automotiva e de construção civil. A escolha entre os dois processos impacta diretamente a produtividade e a eficiência, sendo fundamental a seleção adequada de acordo com a necessidade industrial.

Palavras-chave: Soldagem. TIG. Arco elétrico. MIG/MAG.

Abstract

This study focuses on the analysis of the TIG (*Tungsten Inert Gas*) and MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) welding processes, widely used in the manufacture of metallic structures in sectors such as the automotive industry, civil construction and aerospace. The evolution of welding over the years, from manual methods to automated systems, reflects the growing demand for precision, strength and efficiency in manufacturing processes. The main objective of the research is to understand the characteristics and applications of TIG and MIG/MAG welding processes, offering guidelines for the appropriate choice of each method. The study aims to technically analyze both processes, considering their efficiency, precision and quality in the context of different industrial applications. The methodology adopted included a review of technical literature and comparative studies, evaluating aspects such as quality of finish, speed of application and suitability for specific materials. The results showed that the TIG process is ideal for welds that require high quality and precision, being widely used in the aerospace and electronics industries. On the other hand, the MIG/MAG process, with its greater speed and ease of operation, is preferred in large-scale productions, such as in the automotive and construction industries. The choice between the two processes directly impacts productivity and efficiency, and appropriate selection according to industrial needs is essential.

Keywords: Welding. TIG. Electric arc. MIG/MAG.

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é uma técnica fundamental no desenvolvimento de estruturas metálicas, sendo amplamente utilizada em diversos setores, como a indústria automotiva, de construção civil, e aeroespacial. Historicamente, os métodos de soldagem evoluíram em resposta às demandas por maior resistência, precisão e eficiência, desde os processos manuais básicos até os altamente sofisticados sistemas automatizados utilizados. Ao longo dos anos, novos processos foram desenvolvidos para atender à crescente complexidade dos projetos e garantir a segurança e a durabilidade dos produtos finais.

Entre os métodos mais reconhecidos e aplicados na indústria contemporânea, destacam-se os processos de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) e MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*). O processo TIG, introduzido na década de 1940, é conhecido por seu nível de precisão, ideal para soldas que exigem alta qualidade e acabamento, como nas indústrias aeroespacial e de produtos eletrônicos. Já o MIG/MAG, desenvolvido em meados do século XX, oferece uma solução eficiente para soldas de produção em massa, sendo amplamente utilizado em indústrias automotivas e de construção, devido à sua velocidade e facilidade de aplicação.

A relevância desse tema decorre da importância crescente da soldagem na modernização de indústrias que exigem métodos cada vez mais especializados para atender a padrões elevados de qualidade. A escolha correta entre os processos TIG e MIG/MAG pode impactar significativamente a produtividade, a eficiência e a segurança em diversas áreas de fabricação. Diante disso, investigar esses métodos é essencial para aprimorar o entendimento sobre as suas particularidades e permitir a escolha adequada para diferentes aplicações industriais.

O problema de pesquisa que orienta este estudo é: como as características específicas dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG influenciam sua aplicação em diversos materiais e contextos industriais?

O objetivo geral desta pesquisa é estudar os processos de soldagem TIG e MIG/MAG, a fim de compreender suas características e aplicações, fornecendo diretrizes para a seleção adequada de cada método. Como objetivo específico, busca-se analisar as características técnicas de cada processo e identificar as principais aplicações industriais para otimizar a escolha do método de soldagem mais apropriado.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio de uma revisão de literatura com abordagem qualitativa e descritiva, seguindo uma estrutura dividida em cinco etapas principais: identificação do tema e formulação da hipótese; definição dos critérios de inclusão e exclusão dos estudos; seleção e categorização dos estudos relevantes; avaliação das informações extraídas; e, por fim, interpretação e apresentação dos resultados, proporcionando uma síntese do conhecimento disponível.

A busca pelos estudos foi realizada em bases de dados reconhecidas, como a *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), PUBMED, e MEDLINE, abrangendo materiais publicados entre 2019 e 2024. Os critérios de inclusão adotados foram: artigos completos,



publicados em português, com acesso integral e dentro do período de 2020 a 2024. Artigos publicados fora desse intervalo de tempo foram excluídos.

2.2 Resultados e Discussão

O processo de soldagem conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) envolve o estabelecimento de um arco elétrico entre a ponta de um eletrodo consumível e o metal base. Esse eletrodo é fornecido de forma contínua durante o processo. Por meio dessa técnica, é possível realizar a soldagem de diversos metais e ligas comerciais, como aços de alta resistência e baixa liga, aços carbono, ligas de níquel, alumínio e cobre. Para que a soldagem seja eficiente em diferentes posições, é fundamental que o processo seja devidamente parametrizado (Scotti; Ponomarev, 2014).

De acordo com Correa (2018), para garantir a ionização adequada do meio e a proteção da poça de fusão, assim como das gotas em transferência e do metal de adição, utiliza-se um gás de proteção. Esse gás tem a função de evitar a contaminação proveniente da atmosfera. Os gases empregados podem ser inertes, como o argônio e o hélio, ou ativos, como o dióxido de carbono. Em algumas aplicações, utiliza-se uma mistura de gases inertes e ativos, a depender do material a ser soldado e da finalidade do processo.

De forma simplificada, o processo de soldagem MIG/MAG pode ser esquematizado com base em uma configuração que envolve a proteção gasosa, o eletrodo consumível e o arco elétrico. A escolha dos gases de proteção e o ajuste correto dos parâmetros são essenciais para garantir a qualidade da soldagem e sua aplicação em diferentes tipos de materiais e posições, conforme figura a seguir (Félix, 2021).

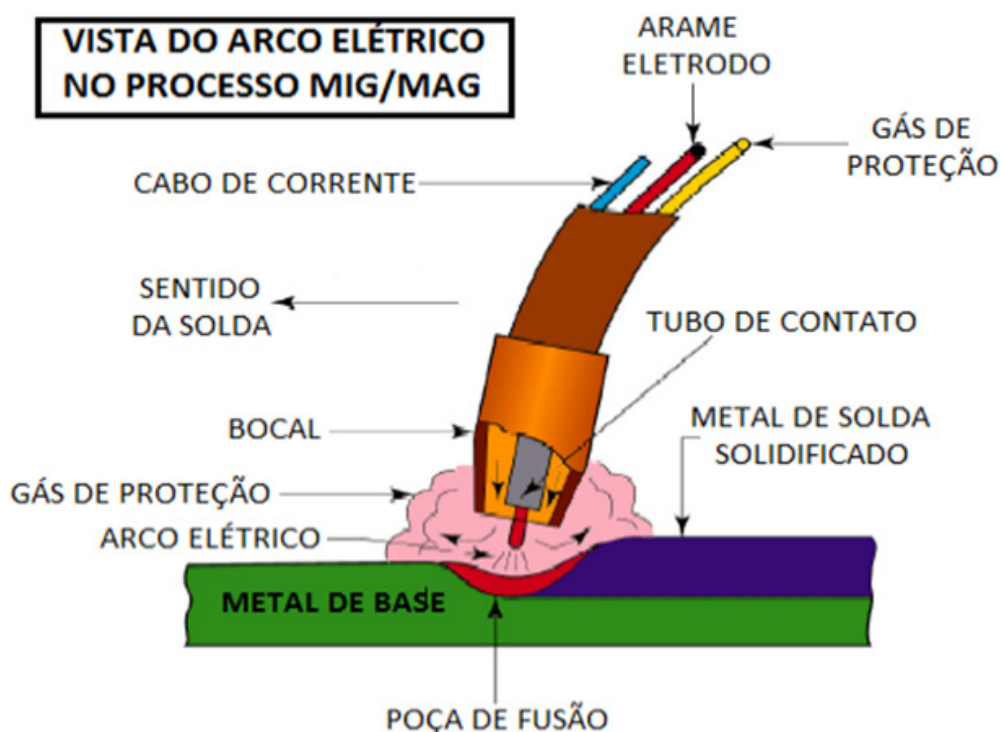


Figura 1. Exemplo de figura Representação da soldagem MIG/MAG

Fonte: Adaptado Santana (2023).

De acordo Marques (2023), os especialistas, o processo de soldagem utilizam corrente

contínua (CC), geralmente com o arame no pólo positivo, configuração essa conhecida como polaridade reversa. A polaridade direta é raramente utilizada, pois resulta em uma transferência ineficiente do metal fundido do arame para a peça a ser soldada.

Segundo Andrade (2016), as correntes de soldagem comumente variam de 50 A até mais de 600 A, com tensões entre 15 V e 32 V. Para garantir um arco elétrico estável e auto-corrigido, é fundamental o uso de uma fonte de tensão constante associada a um alimentador de arame com velocidade constante.

Segundo Júnior *et al.* (2016), melhorias contínuas no processo MIG/MAG tornaram essa técnica aplicável à soldagem de praticamente todos os metais comercialmente importantes, como os aços, alumínio, aços inoxidáveis, cobre e diversos outros. Materiais com espessuras superiores a 0,76 mm podem ser soldados em praticamente todas as posições, o que amplia a versatilidade e a eficiência do processo em diferentes aplicações industriais.

De acordo com Magalhães e Silva (2017), especialistas, o processo de soldagem MIG/MAG envolve a utilização de diversos equipamentos essenciais para garantir a eficiência e a qualidade do procedimento. A fonte de energia, que geralmente opera em corrente contínua (CC) com tensão constante, é fundamental para fornecer a corrente elétrica necessária para a criação do arco elétrico. A tocha de soldagem, por sua vez, é o dispositivo manual utilizado pelo soldador para guiar o arame, direcionando o gás de proteção e a corrente elétrica até a peça de trabalho (Scotti; Ponomarev, 2014).

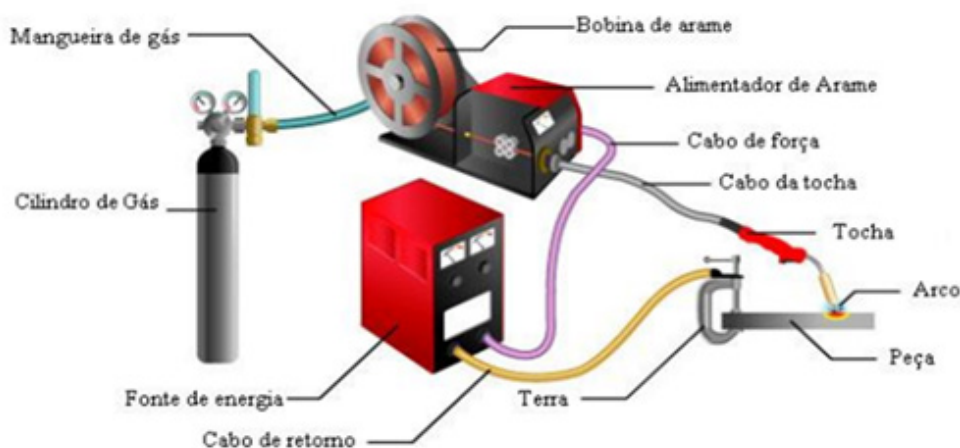


Figura 2. Equipamentos na solda MIG/MAG

Fonte: Adaptado Santana (2023).

Segundo Hosseini *et al.* (2016), o alimentador de arame é responsável por puxar o arame do rolo e alimentá-lo de forma constante até a tocha, com velocidade ajustada de acordo com o material e a espessura da peça. O cilindro de gás de proteção contém o gás necessário para proteger a poça de fusão da contaminação atmosférica, sendo o argônio ou uma mistura de argônio e CO_2 usados no MIG e o CO_2 no MAG. De acordo com Júnior *et al.* (2016), essa inclinação favorece a proteção adequada da poça de fusão pelo gás e permite um melhor controle do cordão de solda. O ângulo correto pode variar dependendo da posição de soldagem e do tipo de material. Conforme a figura 3, esse posicionamento é essencial para evitar defeitos como porosidade e respingos, garantindo a eficiência do processo.

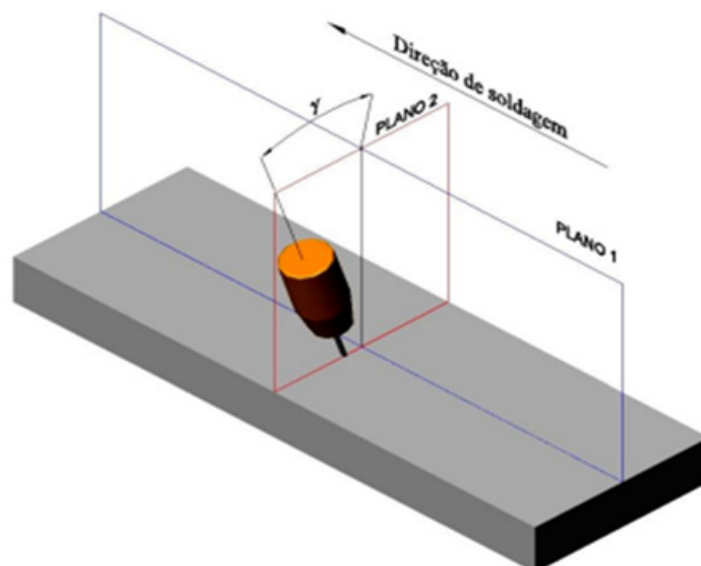


Figura 3. Ângulo de Soldagem

Fonte: Adaptado Santana (2023).

O processo de soldagem MIG/MAG oferece diversas vantagens em relação a outros métodos de soldagem. O alto fator de operação e a elevada taxa de deposição proporcionam um aumento significativo de produtividade, especialmente quando comparado a processos como TIG e eletrodos revestidos (Magalhães; Silva, 2017).

O arame de solda atua tanto como eletrodo quanto como material de adição, preenchendo o espaço entre as peças. Além disso, o regulador de fluxo de gás garante o uso adequado do gás de proteção, e, em alguns casos, o sistema de refrigeração é utilizado para evitar o superaquecimento da tocha durante soldagens de alta intensidade. Todos esses equipamentos, devidamente ajustados, tornam o processo MIG/MAG aplicável a uma ampla gama de materiais e condições de soldagem (Santana, 2023).

O ângulo de inclinação da tocha durante o processo de soldagem MIG/MAG é um fator crucial para a qualidade da solda. Ele influencia diretamente a estabilidade do arco elétrico, a penetração da solda e o controle da poça de fusão. Em geral, a tocha deve ser inclinada entre 10° e 20° em relação à peça de trabalho, no sentido do avanço da soldagem (Yvinec, 2021).

Além disso, permite a soldagem em todas as posições, o que representa uma vantagem sobre a soldagem por arco submerso. Outra característica importante é a capacidade de formar cordões mais longos em um intervalo de tempo menor, devido à alimentação contínua do eletrodo, eliminando a necessidade de interrupções (Correa, 2018).

De acordo com Maroski *et al.* (2022), o processo também mantém o comprimento do arco aproximadamente constante, o que reduz a interferência do operador na qualidade do cordão soldado. Ele possibilita ainda o uso de altas velocidades de soldagem e gera uma quantidade reduzida de fumos e escória, em comparação a outros processos. A flexibilidade do MIG/MAG é outra vantagem, permitindo diferentes tipos de transferência metálica, conforme os parâmetros e consumíveis utilizados.

Por outro lado, existem algumas desvantagens associadas ao processo. É necessário um ajuste preciso dos parâmetros de soldagem para atingir depósitos com as características desejadas. Além disso, o custo de aquisição e manutenção dos equipamentos é mais elevado em comparação ao processo de eletrodos revestidos (Marques, 2023).

De acordo Félix (2021), a forma como as gotas de metal se desprendem do arame em

direção à poça de fusão exerce uma influência direta na qualidade das soldas produzidas no processo de soldagem MIG/MAG. Fatores como corrente, tensão, comprimento do arco, gás de proteção, bem como os materiais envolvidos e os diâmetros dos eletrodos, afetam diretamente o tamanho das gotas, a frequência com que elas se destacam, a geração de respingos, a estabilidade do processo e a possibilidade de realizar soldagem em múltiplas posições.

Existem diferentes classificações para os modos de transferência metálica no processo MIG/MAG. Segundo pesquisadores, esses modos podem ser divididos em duas classes: a classe de modos naturais e a classe de modos controlados. A classe de modos naturais inclui o grupo de transferências por contato, no qual a transferência por curto-circuito é a mais notável, e o grupo de transferências por voo livre, onde se destacam as transferências globular e goticular (Magalhães; Silva, 2017)

Na classe de modos controlados, dois tipos de transferência ganham destaque para os fins deste trabalho: a transferência pulsada e a transferência por curto-circuito controlado. Esses modos permitem um maior controle sobre o processo de soldagem, reduzindo respingos e garantindo maior estabilidade e precisão na formação da solda. Cada um desses tipos de transferência tem características específicas que influenciam o resultado final, dependendo dos parâmetros e materiais utilizados (Brites; Da Silva; De Brito, 2018).

A transferência globular é caracterizada pelo destacamento de gotas cujo diâmetro geralmente é maior do que o do próprio eletrodo (conforme ilustrado na Figura 4). Nesse processo, a principal força que promove a transferência do metal líquido durante a soldagem é a gravidade, superando as forças da tensão superficial e a eletromagnética (Andrade, 2016).

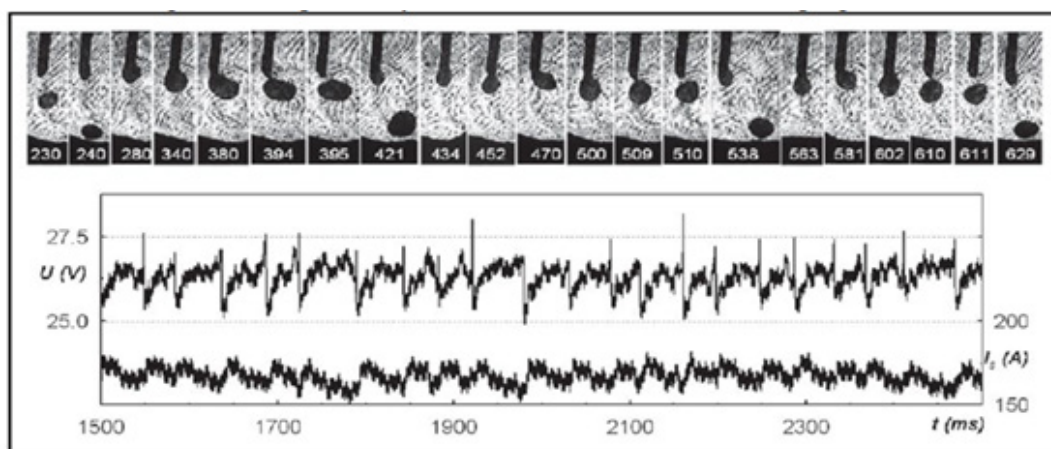


Figura 4. Representação da transferência metálica do tipo globular

Fonte: Reis et al. (2019).

Conforme Marques (2023), os níveis de tensão necessários para alcançar a transferência globular podem variar de intermediários a altos, enquanto os valores de corrente média são relativamente baixos, independentemente do tipo de gás de proteção utilizado. Nesses valores de corrente, as forças eletromagnéticas que atuam sobre a gota não desempenham um papel determinante no seu destacamento da ponta do arame.

O modo pulsado é um exemplo desse aprimoramento, caracterizando-se pelo controle da corrente de soldagem em dois níveis: a corrente de pico (I_p), que está acima da corrente de transição, e a corrente de base (I_b), que está abaixo desse nível. Essa variação controlada permite manter a corrente média abaixo da corrente de transição, mas ainda assim garante a transferência metálica do tipo goticular, o que é o principal objetivo do método (Hosseini et al., 2016).

O esquema representativo do modo pulsado mostra que a corrente de soldagem alterna entre os dois patamares durante intervalos de tempo determinados conforme figura 5 a seguir. O tempo de pico (t_p) corresponde ao período em que a corrente de pico é mantida, enquanto o tempo de base (t_b) é o intervalo no qual a corrente de base é aplicada, proporcionando um controle eficiente da transferência metálica (Júnior *et al.*, 2016).

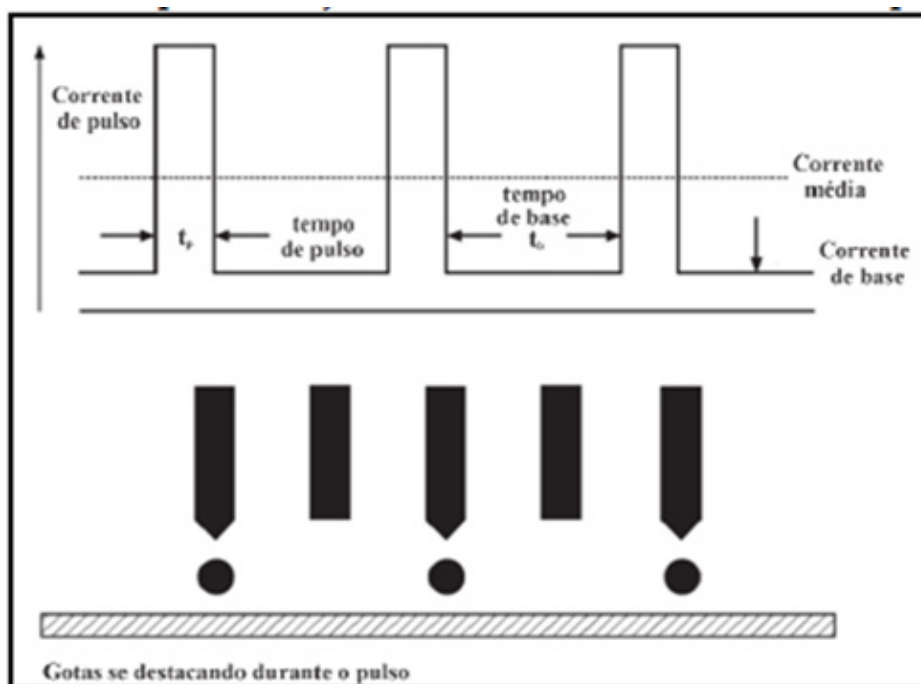


Figura 5. Representação do modo de transferência pulsado

Fonte: Adaptado Marques (2023).

De acordo Santana (2023), o controle da corrente no modo de curto-circuito controlado conforme abaixo surgiu como uma evolução da transferência metálica por curto-circuito convencional, com o objetivo de melhorar os aspectos problemáticos desse processo. Entre os principais problemas a serem mitigados estão a quantidade excessiva de respingos, a baixa capacidade de molhabilidade e a transferência metálica irregular.

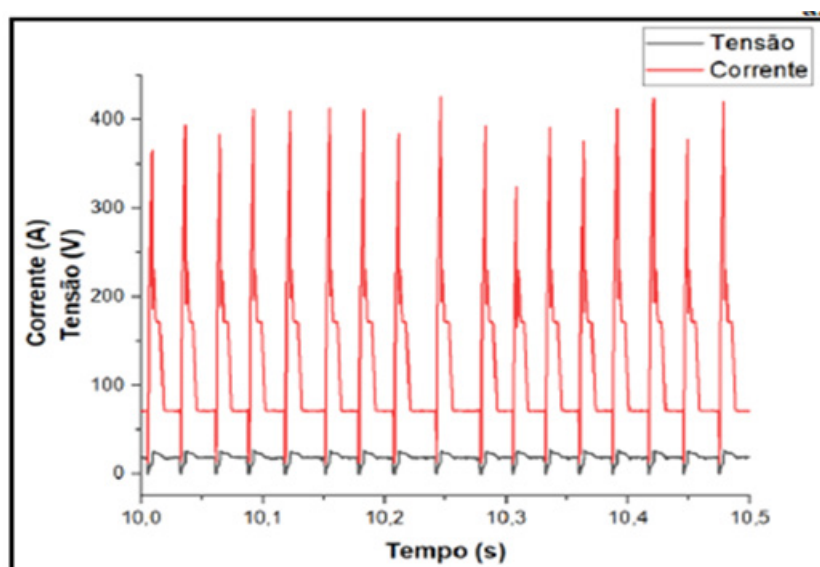


Figura 6. Curto-circuito convencional

Fonte: Adaptado Marques (2023).

Além disso, essa técnica visa proporcionar um controle térmico mais eficaz da poça de fusão, permitindo um controle preciso da penetração, independentemente da velocidade de alimentação do arame. Ela também é adequada para aplicações especiais, como a execução de passes de raiz, a soldagem de chapas finas e a soldagem em múltiplas posições (Scotti; Ponomarev, 2014).

De acordo com Júnior et al. (2016), um dos fatores essenciais para o sucesso do processo é a correta parametrização da corrente de soldagem, que é responsável pela regulação da transferência metálica. Embora o ajuste da corrente dependa também da indutância e da escolha do metal de adição, a precisão desses parâmetros é crucial para garantir um arco mais estável

2.2.1 Processo de Soldagem TIG

De acordo com Marques (2023), o processo de soldagem TIG consiste na união de peças metálicas por meio da fusão proporcionada pelo arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio e a peça. Segundo Costa (2015), a soldagem por arco elétrico TIG (*Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*) utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio, que é protegido pelo bocal da tocha, para criar a poça de soldagem. No processo TIG, ilustrado na Figura 7, a utilização de metal de adição é opcional.

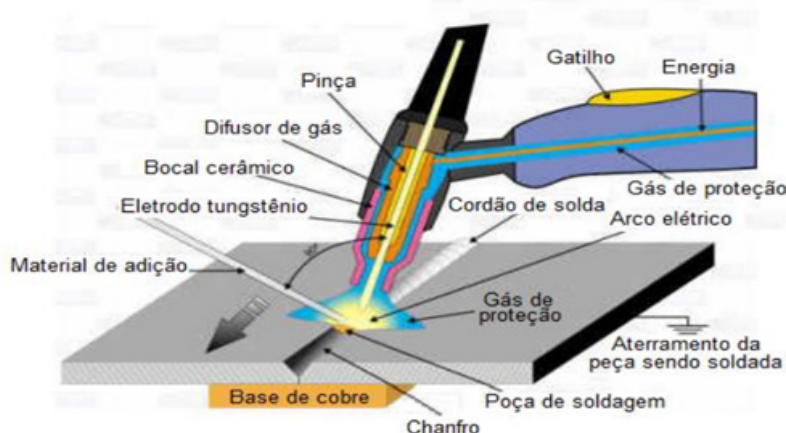


Figura 7. Equipamentos na solda MIG/MAG

Fonte: Adaptado Costa (2015).

Esse método é amplamente utilizado na indústria devido ao seu baixo custo em comparação com alguns outros processos de soldagem e à alta qualidade dos resultados que proporciona. Além disso, o processo TIG oferece flexibilidade em sua aplicação, podendo ser empregado de diversas maneiras (Yvinec, 2021).

De acordo com Costa (2015), o processo de soldagem TIG (*Gas Tungsten Arc Welding*) utiliza uma série de equipamentos e componentes essenciais para garantir sua eficácia e qualidade. A fonte de energia é fundamental, fornecendo o arco elétrico necessário para a soldagem, e pode ser uma fonte de corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA), conforme o tipo de material a ser soldado.

A tocha TIG, que abriga o eletrodo de tungstênio e o gás de proteção, é projetada para permitir um controle preciso do arco elétrico e da poça de soldagem. O eletrodo de tungstênio, não consumível e altamente resistente ao calor, cria o arco elétrico, enquanto o gás de proteção, geralmente argônio ou hélio, protege a poça de soldagem e o eletrodo

da contaminação atmosférica, conforme figura 8 a seguir (Andrade, 2016).

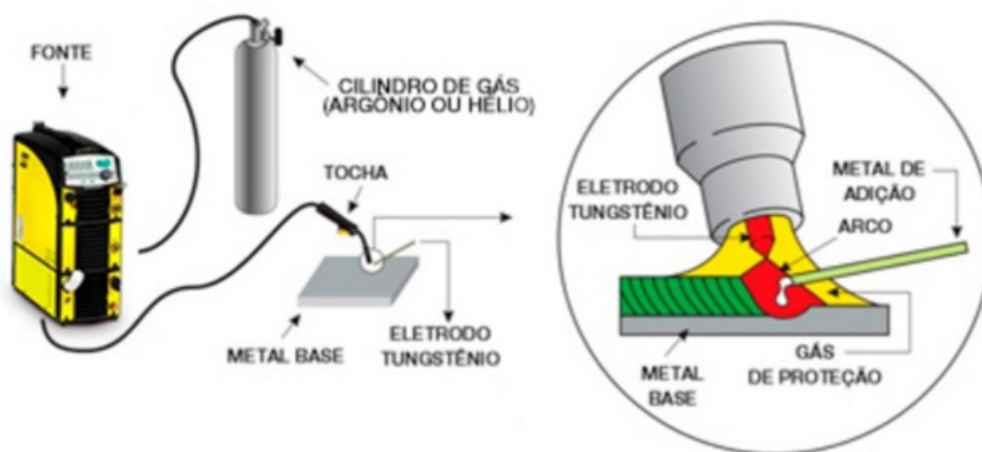


Figura 8. Equipamentos Solda TIG

Fonte: Adaptado Costa (2015).

Segundo Félix (2021), a indústria aeroespacial seja uma das principais usuárias da soldagem TIG, esse processo pode ser amplamente aplicado em diversas outras áreas, especialmente na soldagem de peças complexas e/ou finas. Ele se destaca no trabalho com metais não ferrosos e aços que contêm aditivos como nitrogênio, alumínio, silício, manganês, enxofre e carbono.

A versatilidade do processo TIG permite sua utilização em setores variados que requerem alta precisão e qualidade na soldagem. Isso o torna ideal para a fabricação de componentes delicados, garantindo a integridade estrutural e a durabilidade das peças soldadas, mesmo em ambientes exigentes (Costa, 2015).

De acordo Santana (2023), o processo de soldagem TIG pode ser operado de forma manual ou automática, sendo a operação manual a mais amplamente utilizada. Uma das principais vantagens desse processo é a possibilidade de controle independente da fonte de calor e do metal de adição, o que permite a soldagem de peças com espessuras pequenas e com características de difícil soldabilidade.

Apesar dessas vantagens, o processo TIG é relativamente lento e de custo elevado. Dessa forma, é utilizado principalmente em situações em que a qualidade da solda é mais importante que o custo da operação. Sua aplicação é bastante comum na soldagem de materiais como alumínio, aços inoxidáveis, magnésio e titânio, todos empregados em processos que exigem alta precisão (Brites; Da Silva; De Brito, 2018).

As osciladoras utilizadas no processo de soldagem TIG têm a função de melhorar a estabilidade do arco elétrico, o que é crucial em aplicações que exigem alta precisão, como na soldagem de materiais finos ou em condições operacionais mais desafiadoras. Essas osciladoras introduzem uma oscilação na corrente de soldagem, permitindo que o arco se mantenha mais estável durante todo o processo. Como resultado, a solda produzida tende a ser de maior qualidade, com menor incidência de defeitos e melhor acabamento superficial (Santana, 2023).

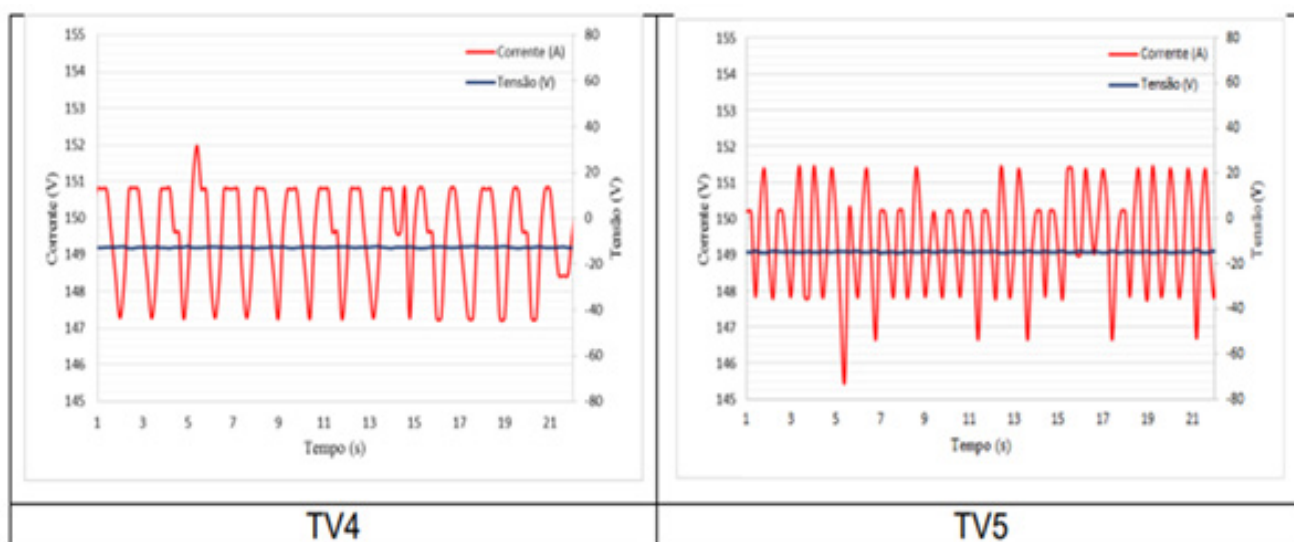


Figura 9. Osciladores processo TIG

Fonte: Adaptado Costa (2015).

Segundo Hosseini *et al.* (2016), além desses componentes, o processo pode incluir um sistema de alimentação de metal de adição, que, quando utilizado, auxilia na adição de material à poça de soldagem para preencher a junta e melhorar a qualidade da solda. A máscara de soldagem e as roupas de proteção, como aventais e luvas, são essenciais para a segurança do soldador, protegendo-o da radiação UV e dos respingos de metal quente.

Outro benefício significativo das osciladoras é o aprimoramento do controle da penetração e da largura do cordão de solda. Isso é especialmente importante em aplicações onde a uniformidade da soldagem é essencial para garantir a integridade estrutural da peça. A oscilação controlada da corrente permite uma distribuição mais homogênea do calor, contribuindo para uma fusão eficiente do metal e minimizando problemas como porosidade e inclusões (Magalhães; Silva, 2017).

Conforme Correa (2018), em processos automáticos ou mecanizados de soldagem TIG, o uso de osciladoras se torna ainda mais relevante, pois permite um controle mais preciso dos parâmetros de soldagem. Isso não só reduz a necessidade de retrabalho, como também melhora a eficiência geral do processo. Parte superior do formulário

Conforme Marques (2023), um dos desafios do processo TIG é o risco de oxidação do metal derretido, já que a temperatura da solda é extremamente alta. Se o metal fundido ficar exposto ao oxigênio, ocorre a oxidação, comprometendo a qualidade da solda. Para evitar esse problema, o soldador utiliza um fluxo constante de gás inerte ou não reativo, que é alimentado pela tocha durante a soldagem

Esse fluxo de gás não reativo é crucial para manter o oxigênio fora do cordão de solda durante os segundos críticos após a fusão do metal. Isso assegura que a solda permaneça intacta e livre de contaminações, resultando em uma soldagem limpa e de alta qualidade, especialmente importante em aplicações que exigem precisão, como na indústria aeroespacial e na fabricação de tubulações de alta resistência (Brites; Da Silva; De Brito, 2018).

Os custos dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG na indústria variam significativamente devido às diferenças em equipamentos, insumos e produtividade. O processo TIG possui custos iniciais mais elevados, associados à aquisição de tochas específicas e gases de proteção de alta pureza, como argônio. Já o MIG/MAG apresenta menor custo inicial, com equipamentos mais acessíveis e gases como CO₂, amplamente disponíveis e de menor valor, sendo mais vantajoso em termos de investimento inicial (Magalhães; Silva, 2017).

Em termos de produtividade, o MIG/MAG é mais eficiente, permitindo maior taxa de deposição e velocidade na execução das soldas, o que reduz custos operacionais relacionados à mão de obra, como afirma Marques (2023). Por outro lado, o processo TIG, mais lento e exigente, requer maior tempo de execução, o que pode elevar os custos de produção em aplicações de grande escala, embora seja preferido em indústrias que priorizam qualidade e precisão, como a aeronáutica.

Além disso, conforme Correa (2018), os custos operacionais do MIG/MAG podem ser elevados devido ao consumo constante de arames e gases, enquanto o TIG, por utilizar eletrodos de tungstênio não consumíveis, tem menor custo de manutenção. No entanto, o menor retrabalho no TIG, por sua precisão, pode compensar os gastos iniciais em determinadas aplicações, equilibrando os custos no longo prazo.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise detalhada dos processos de soldagem TIG e MIG/MAG permitiu uma compreensão aprofundada de suas características, vantagens e aplicações industriais. O estudo atingiu seu principal propósito de fornecer diretrizes claras para a escolha do processo adequado, considerando fatores como precisão, qualidade e eficiência de produção. A pesquisa demonstrou que o TIG é mais apropriado para soldas que requerem acabamento de alta qualidade e precisão, enquanto o MIG/MAG é ideal para produções em massa, com alta velocidade e facilidade de operação.

A resposta ao problema de pesquisa foi devidamente respondida, mostrando que a escolha entre TIG e MIG/MAG pode impactar significativamente a produtividade e a qualidade em diferentes setores industriais. No entanto, algumas limitações foram identificadas, como a falta de estudos experimentais em condições reais de produção, o que poderia fornecer dados mais precisos sobre o desempenho de cada método em diferentes situações.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas voltadas à soldagem de novos materiais, como ligas avançadas e compósitos, além da integração de tecnologias automatizadas, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. Também seria relevante explorar soluções sustentáveis e ecológicas, que reduzam o impacto ambiental dos processos de soldagem, promovendo maior eficiência e responsabilidade ambiental na indústria.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. C. **Desenvolvimento e Análise de Técnicas de Soldagem de Reparos com Deposição em Dupla Camada de Aços Inoxidáveis AWS ER309L e AWS ER347 Aplicados sobre Aços Estruturais 2,25Cr-1Mo E 2,25Cr-1Mo-0,25V**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- BRITES, Lucas; DA SILVA, Eduardo Miguel; DE BRITO, Tarcisio Gonçalves. **Influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas e econômicas de uma solda com arame tubular autoprotegido**. 2018.
- CORREA, Celso Alves. Uma contribuição ao processo de soldagem de revestimento com arame tubular pulsado de um aço CA6NM aplicando o método de Taguchi. **Campinas (SP): Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas**, 2018.
- COSTA, Pedro Henrique Sales da. **Estudo dos processos TIG alimentado e MIG-P CC+ aplicados ao passe de raiz na liga AA5052**. 2015. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia,

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

FÉLIX, Reginaldo Alves. **Efeito das configurações elétricas sobre os parâmetros geométricos em soldas obtidas ao arco elétrico com os processos por eletrodo revestido, MIG/MAG e TIG**: uma revisão. 2021. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

HOSSEINI, Vahid A. et al. Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel. **Welding in the World**, v. 60, p. 233-245, 2016.

JÚNIOR, Edésio Edmur Duarte Louzada et al. **Avaliação metalúrgica da soldagem de revestimento com aço inoxidável austenítico sobre aço ASTM A-36**. 2016.

MAGALHÃES, E. S.; SILVA, S. M. M. L. **Uma Análise Numérica e Inversa do Processo de Soldagem TIG em Alumínio**: Uma Análise Microestrutural Usando Problemas Inversos. São Paulo: Novas edições acadêmicas, 2017. 104f.

MAROSKI, Marcelo et al. Modelagem matemática da eficiência térmica da soldagem a arco elétrico utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 14, n. 3, p. 72-85, 2022.

MARQUES, Felipe Wendrio da Silva. **Estudo do processo de soldagem MIG/MAG para aplicações de revestimentos em aços usando a liga AWS ERNiCrMo-3 na posição horizontal**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SANTANA, Thiago Henrique Bezerra de. **Avaliação da soldagem TIG com arame e TIG orbital autógena na união tubo-espelho de titânio para trocador de calor**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG**: melhor entendimento, melhor desempenho. 2. ed. São Paulo – SP: Artliber Editora Ltda, 2014.

YVINEC, Kévin. **Uma investigação sobre a prioridade da invenção do processo de soldagem a arco elétrico**. 2021. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.



Resumo

Este estudo teve como objetivo analisar a interação entre a gestão da manutenção e a Indústria 4.0, destacando os impactos dessa convergência para as empresas. A Indústria 4.0, impulsionada por tecnologias como IoT, big data e IA, transforma a forma como a manutenção é gerida, permitindo uma abordagem mais preditiva e eficiente. O trabalho revisou conceitos e práticas da gestão da manutenção, além de caracterizar as principais inovações tecnológicas da Indústria 4.0. A metodologia foi uma revisão de literatura qualitativa e descritiva, baseada na análise de artigos, livros e teses. A pesquisa evidenciou que a integração de tecnologias digitais proporciona uma monitoração contínua dos ativos, melhorando a eficiência na prevenção de falhas e reduzindo os tempos de inatividade nas empresas. No entanto, foram apontadas dificuldades, como a necessidade de altos investimentos e a capacitação técnica para implementação. Conclui-se que a evolução da gestão da manutenção está diretamente ligada à adoção de ferramentas da Indústria 4.0. Recomenda-se que as empresas explorem essas tecnologias para otimizar seus processos, apesar dos desafios. Estudos futuros poderiam investigar estratégias para tornar essas soluções mais acessíveis e mensurar os impactos econômicos a longo prazo dessa modernização.

Palavras-chave: Gestão Manutenção. Industria 4.0. Planejamento. Controle.

Abstract

This study aimed to analyze the interaction between maintenance management and Industry 4.0, highlighting the impacts of this convergence for companies. Industry 4.0, driven by technologies such as IoT, big data and AI, transforms the way maintenance is managed, enabling a more predictive and efficient approach. The work reviewed maintenance management concepts and practices, in addition to characterizing the main technological innovations of Industry 4.0. The methodology was a qualitative and descriptive literature review, based on the analysis of articles, books and theses. The research showed that the integration of digital technologies provides continuous monitoring of assets, improving efficiency in preventing failures and reducing downtime in companies. However, difficulties were highlighted, such as the need for high investments and technical training for implementation. It is concluded that the evolution of maintenance management is directly linked to the adoption of Industry 4.0 tools. It is recommended that companies explore these technologies to optimize their processes despite the challenges. Future studies could investigate strategies to make these solutions more accessible and measure the long-term economic impacts of this modernization.

Keywords: Maintenance Management. Industry 4.0. Planning. Control.



1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 representa uma transformação radical na maneira como as fábricas operam, impulsionada pela convergência de tecnologias digitais avançadas, como Internet das Coisas (IoT), big data, inteligência artificial (IA) e automação. Este novo paradigma industrial não apenas redefine a eficiência e a flexibilidade das operações de produção, mas também tem um impacto profundo na gestão da manutenção (Souza, 2020).

A integração de tecnologias inteligentes e sistemas conectados permite uma abordagem mais proativa e preditiva na manutenção de equipamentos e sistemas, desafiando os métodos tradicionais que se baseavam predominantemente em manutenção corretiva e preventiva (Cardoso, 2020).

O advento da Indústria 4.0 introduz ferramentas e técnicas que possibilitam uma monitoração contínua e em tempo real dos ativos, oferecendo uma visão mais detalhada e precisa sobre o estado e o desempenho dos equipamentos. Isso não apenas melhora a capacidade de antecipar falhas antes que elas ocorram, mas também otimiza os recursos de manutenção e reduz os tempos de inatividade (Freitas, 2020).

A gestão da manutenção deve buscar uma evolução contínua, procurando aprimorar suas ferramentas e desenvolver processos mais eficientes para a manutenção dentro das empresas. Isso implica na necessidade de integrar inovações tecnológicas oferecidas pela Indústria 4.0. Diante disso, surge a questão: Como a gestão da manutenção interage com os conceitos da Indústria 4.0?

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a interação entre a gestão da manutenção e a Indústria 4.0, além de analisar os impactos dessa interação para as empresas. Os objetivos específicos incluem: caracterizar a Indústria 4.0 e suas principais características; descrever os conceitos e práticas da gestão da manutenção; e identificar como a gestão da manutenção se relaciona com a Indústria 4.0, incluindo as vantagens e desvantagens dessa interação.

A metodologia utilizada foi uma abordagem qualitativa descritiva, do tipo revisão de literatura. Esse tipo de metodologia possibilitou a síntese de informações já existentes e as conclusões a partir do tema proposto. Para a elaboração do trabalho, foi realizada uma revisão de literatura, baseada em artigos, livros e monografias, publicados no Google Acadêmico, Scielo, Lilacs e banco de teses e dissertações de universidades brasileiras. Na pesquisa, foi realizada a leitura analítica de forma que as teorias levantadas conduzissem à obtenção da resposta ao problema de pesquisa apresentado. O período utilizado para a busca compreendeu os últimos 10 anos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Resultado e Discussão

A evolução da indústria é marcada por transformações tecnológicas significativas que moldaram o desenvolvimento econômico e social ao longo dos séculos. Desde a Primeira Revolução Industrial, no século XVIII, que trouxe a mecanização e o uso de máquinas a vapor, até a Quarta Revolução Industrial, caracterizada pela integração de tecnologias digitais, a indústria tem desempenhado um papel central na modernização das sociedades (Freitas *et al.*, 2020).

Durante a Segunda Revolução Industrial, no século XIX, o surgimento da eletricidade e do motor de combustão interna possibilitou a produção em massa e o crescimento das cidades. Essa fase consolidou a industrialização como um fenômeno global, ampliando o alcance dos produtos e serviços a uma escala nunca antes vista (Cardoso, 2020).

No final do século XVIII, a introdução das máquinas a vapor e o uso da força hidráulica transformaram a indústria, marcando um grande avanço que deu origem à 2ª Revolução Industrial. Durante essa era, a manutenção dos equipamentos era predominantemente corretiva, focando na limpeza e lubrificação após a ocorrência de falhas, já que a produtividade era a prioridade (Souza, 2020).

A Terceira Revolução Industrial, iniciada no século XX, introduziu a automação e a tecnologia da informação, transformando as fábricas em centros altamente produtivos e interconectados. Cada fase industrial representou um avanço na capacidade de produção e na eficiência dos processos, impulsionando a urbanização e a criação de novos setores econômicos (Almeida, 2019).

A Figura 1 ilustra a evolução das revoluções industriais ao longo do tempo, destacando as principais transformações tecnológicas e sociais de cada fase, culminando na Quarta Revolução Industrial, que integra tecnologias emergentes como inteligência artificial, IoT e big data para a criação de fábricas inteligentes e processos produtivos altamente customizados (Alberto, 2018).

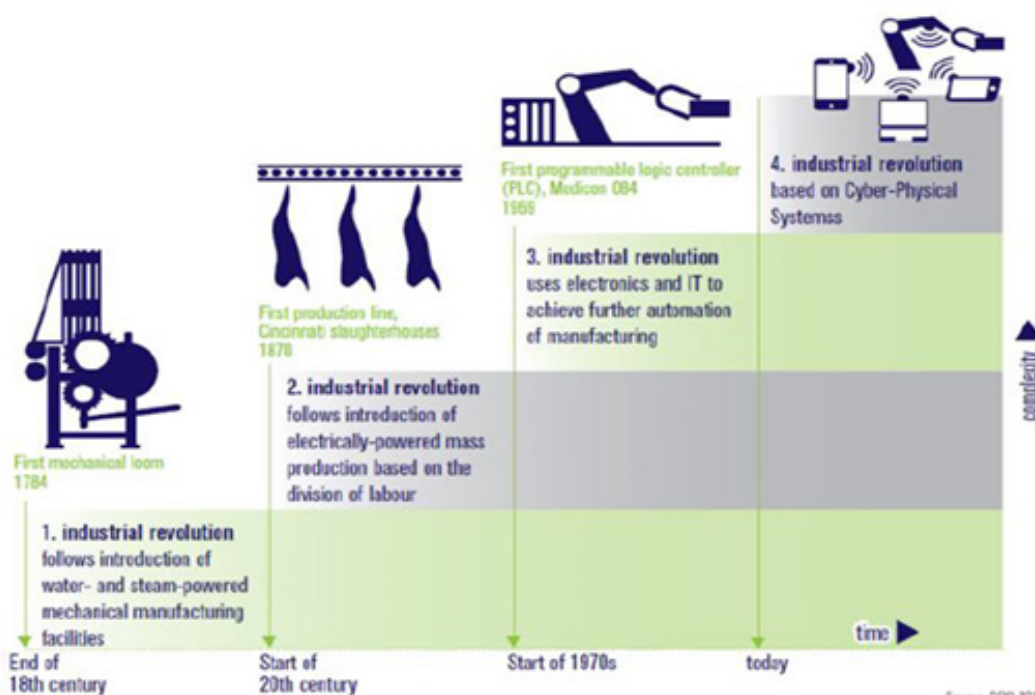


Figura 1. Evolução industrial do ponto de vista temporal

Fonte: Adaptado Alberto (2018).

2.1.1 Planejamento e controle da manutenção - PCM e a Gestão da manutenção

De acordo com Lima e Silva (2019), em um mundo cada vez mais globalizado e competitivo, onde os consumidores buscam constantemente por produtos de alta qualidade a preços acessíveis, as indústrias tiveram que, ao longo dos anos, adaptar seus processos

produtivos para atender à demanda global, sendo moldadas conforme o contexto histórico de cada época.

Nesse cenário, surgiu o Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), com o objetivo de fornecer aos maquinários e sistemas industriais as ferramentas e os procedimentos de gestão necessários para analisar e resolver problemas no ambiente fabril (Dantas, 2019). De acordo com Dantas (2019) afirma que “o PCM fortalece o ciclo de gerenciamento da manutenção em uma organização”. Nesse contexto, as informações diárias registradas nas Ordens de Serviço (O.S.), como dados sobre a máquina, tempo de execução, componente defeituoso, sintoma apresentado, causa do defeito, serviço realizado e técnico responsável, são coletadas e analisadas pelo setor de manutenção com o objetivo de aprimorar a gestão na empresa.

O termo “Indústria 4.0” foi inicialmente difundido em 2011 na cidade de Hanover, na Alemanha, conforme relatado por Dantas (2019). Esse conceito surgiu em um contexto que envolvia investidores, representantes políticos e acadêmicos, com o propósito de alinhar e aprimorar as tecnologias emergentes com o setor industrial alemão.

Tanto o autor brasileiro Silveira (2018) quanto os autores estrangeiros Hermann et al. (2015) e Dantas (2019) concordam que a Indústria 4.0 é baseada em seis princípios fundamentais. Esses princípios, que serão adotados neste trabalho, são: interoperabilidade, virtualização, capacidade de operação em tempo real, orientação a serviços, modularidade e descentralização. Conforme figura 2 a seguir princípios da indústria 4.0.



Figura 2. Seis Princípios

Fonte: Adaptado Dantas (2019).

Segundo Dias (2017), a integração do mundo virtual com o físico por meio de processos ciber-físicos será crucial para o desenvolvimento da Indústria 4.0 e para o surgimento de fábricas inteligentes, capazes de monitorar e tomar decisões virtualmente sobre as variáveis de gestão. Lima (2019) descreve que, inicialmente, o trabalho no setor de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) era realizado de forma manual, utilizando papel e caneta. Com o passar dos anos, esse processo foi parcialmente modernizado com a introdução de computadores, que auxiliaram na organização e no tratamento dos dados coletados.

Silva (2018) destaca que a manutenção industrial tem progredido significativamente na adoção de ferramentas de gestão para suas operações. Os gestores e demais envolvidos no PCM coletam, armazenam e analisam os dados obtidos nas Ordens de Serviço, desenvolvendo diagnósticos que buscam melhorar a produtividade.

Tecnologias como Realidade Aumentada (RA), Nuvem de Dados (*Cloud*), Internet das Coisas (*IoT - Internet of Things*) e Big Data serão cada vez mais aplicadas nesse cenário. Essas inovações permitirão uma maior integração e automação dos processos industriais,

otimizando o desempenho das fábricas e possibilitando uma gestão mais eficiente e proativa da manutenção. A figura 3 a seguir ilustra IIOT-Industrial *Internet of Things* (Delecrodio, 2019).

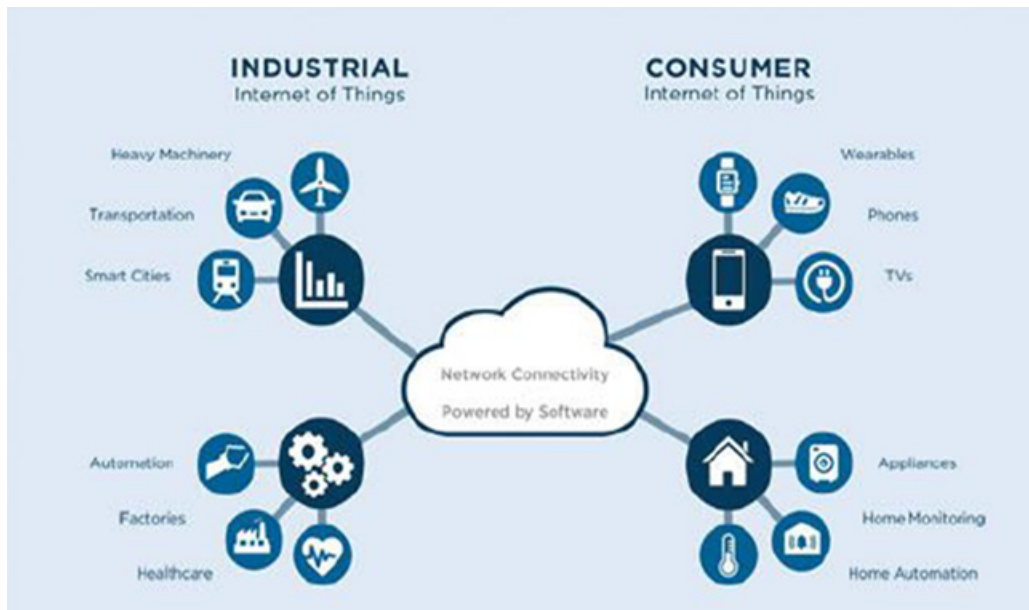


Figura 3. IIOT-Industrial *Internet of Things*

Fonte: Adaptado Alberto (2018).

Os sistemas baseados em realidade aumentada são capazes de gerenciar uma ampla gama de tarefas, desde a seleção de peças em um almoxarifado até o envio de procedimentos de manutenção por dispositivos móveis para técnicos em campo, tornando-se uma ferramenta essencial (Alberto, 2018). Silva (2018) também enfatiza que a Indústria 4.0 projeta a manutenção preditiva como um elemento central nessa mudança de paradigma. Nessa nova fase, as máquinas e outros sistemas fabris possuirão inteligência para informar em tempo real sua eficiência e as necessidades de manutenção aos gestores.

A fábrica inteligente, segundo Borlido (2017), é definida como aquela que opera com máxima eficiência, onde máquinas inteligentes interconectadas colaboram entre si, com os trabalhadores, fornecedores, clientes e com uma cadeia analítica e dinâmica capaz de se autocontrolar. Nesse contexto, várias tecnologias emergentes desempenharão um papel fundamental na nova revolução industrial, especialmente na gestão da manutenção.

Conforme Assad Neto *et al.* (2018), com um mapeamento preciso de maquinários ou processos, é possível realizar simulações que identificam com precisão o local danificado, os suprimentos necessários para a manutenção e os procedimentos adequados, facilitando a atuação dos técnicos na resolução de problemas.

A realidade aumentada também permite a implementação de interfaces homem-máquina (IHMs) que conectam ativos de TI (Tecnologia da Informação) ao operador, fornecendo feedbacks instantâneos sobre o estado do equipamento, o que aumenta a confiabilidade dos procedimentos realizados (Alberto, 2018).

Segundo Klug *et al.* (2023), essa integração física-digital entre operador e maquinário é crucial para a Indústria 4.0. Embora ainda esteja em fase inicial de desenvolvimento, essa tecnologia promete ser extremamente útil no novo cenário industrial, proporcionando maior eficiência ao trabalho através da combinação de informações precisas com a experiência do operador ou técnico responsável.

2.2.2 Aplicação a Sistemas de Manutenção

A Indústria das Coisas promove a comunicação entre máquinas e dispositivos, otimizando a eficiência, segurança e reduzindo custos. O conceito de Internet das Coisas (IoT) refere-se à conectividade entre equipamentos através da internet, permitindo que dispositivos como smartphones e carros inteligentes interajam e controlem sistemas domésticos remotamente (Santos *et al.*, 2018).

Segundo Santos *et al.* (2018), a internet Industrial das Coisas (IIoT) aplica essa conectividade ao ambiente industrial, possibilitando que máquinas se comuniquem e sejam monitoradas em tempo real. A IIoT utiliza tecnologias como big data, machine learning e M2M, proporcionando maior transparência e controle na cadeia de suprimentos, com potencial significativo para transformar a indústria.

De acordo com Mendes *et al.* (2024), a interconexão dos produtos na cadeia de abastecimento tornou o armazenamento de dados uma tarefa complexa, frequentemente compartilhada por diversas empresas. Em resposta a essa necessidade, surgiu a ideia de utilizar a tecnologia de computação em nuvem (*cloud*), que oferece vantagens significativas, como gigabytes de espaço gratuito, segurança dos dados armazenados e sincronização automática de arquivos.

Conforme Delecrodio *et al.* (2019), ao optar por armazenar informações em servidores na nuvem, as empresas podem acessar esses dados de qualquer lugar, utilizando computadores ou smartphones, sem a necessidade de grandes investimentos em armazenamento local. A virtualização, nesse contexto, permite acessar e manipular dados sem que estejam fisicamente presentes nos dispositivos, preservando a integridade e acessibilidade das informações.

A sincronização automática, um dos principais benefícios da nuvem, permite que as alterações feitas em documentos sejam replicadas quase instantaneamente, mesmo que o usuário esteja offline. Isso diferencia os serviços de nuvem, como Google Drive, Dropbox, OneDrive, e outros, dos serviços de *hosting*, onde o upload de arquivos é feito manualmente pelo usuário (Goncalves, 2020).

Segundo Freitas *et al.* (2020), o *hosting* é mais adequado para o armazenamento de arquivos menos acessados, como arquivos históricos. A virtualização, por sua vez, permite a execução de múltiplos serviços ou programas em uma única máquina, maximizando a utilização dos recursos de hardware e reduzindo a necessidade de infraestrutura física adicional, como servidores dedicados. Os tipos mais comuns de virtualização incluem a virtualização de hardware, que possibilita a operação de vários sistemas operacionais em um único equipamento; a virtualização de aplicativos; e a virtualização da apresentação, que permite o acesso remoto a dados de diferentes dispositivos.

Esses métodos resultam em uma significativa redução dos custos de manutenção e infraestrutura, já que eliminam grande parte dos encargos associados aos servidores físicos. Enquanto a *cloud computing* oferece facilidade de uso e redução de custos em sistemas de arquitetura para os clientes, a virtualização concentra-se em otimizar a infraestrutura, demonstrando que ambas as tecnologias são complementares e essenciais para o avanço da Indústria 4.0 (Viannini; Miranda Junior, 2024).

Conforme Lima e Silva (2019), a impressão 3D é atualmente uma das tecnologias mais flexíveis para a concepção e industrialização de produtos, alinhando-se perfeitamente aos princípios da Indústria 4.0. Ferramentas programáveis e editáveis que promovem inovação e flexibilizam processos produtivos, como robôs e impressoras 3D, são características marcantes dessa nova era industrial.

Na Indústria 4.0, a implementação de soluções robotizadas, com menor necessidade de mão-de-obra humana, torna-se cada vez mais evidente. Robôs que interagem com humanos e processos como a impressão 3D, que permitem alcançar soluções de forma mais eficiente e econômica, serão essenciais para a otimização da produção (Borlido, 2017).

Conforme Borlido (2017), na era industrial atual, a digitalização está cada vez mais presente, impulsionando o desenvolvimento de softwares sofisticados que transformam o processo de fabricação. O modelamento digital e a fabricação são aspectos centrais dessa evolução, integrando design e produção através do uso de ferramentas 3D ou CAD (*Computer-Aided Design*). Essas tecnologias permitem a criação de projetos detalhados, que servem como base para a fabricação precisa de produtos.

A conexão entre o CAD e o CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) é fundamental nesse processo. O CAM utiliza os projetos digitais criados no CAD e os converte em G-CODE, uma linguagem específica usada para controlar máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado). Essa tradução é crucial para a automação da produção, permitindo que as máquinas realizem cortes, moldagens e outras operações com alta precisão (Mendes et al., 2024).

Entre as máquinas de fabricação digital destacam-se as CNC, as máquinas de corte a laser e as impressoras 3D. Cada uma desempenha um papel específico na indústria moderna, permitindo a criação de peças complexas com eficiência e exatidão. Essas tecnologias representam um avanço significativo na manufatura, possibilitando a produção personalizada e a otimização dos processos industriais (Almeida, 2019).

De acordo com Klug et al. (2023), o MES é especialmente valioso no setor automotivo, pois oferece um grande potencial na fase de planejamento, reduzindo os tempos de ciclo, o WIP (*Work in Progress*) e o uso de papel. Além disso, o sistema melhora a capacidade de resposta a pedidos dos clientes, tornando-se um elemento essencial para a eficiência e a competitividade das indústrias. A figura 4 a seguir ilustra a pirâmide da automação.

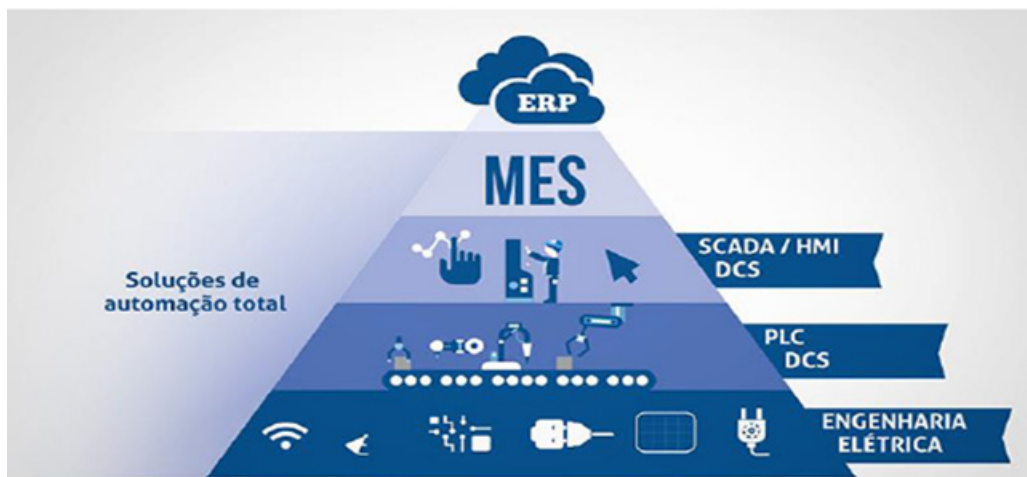


Figura 4. IIOT-Pirâmide da automação

Fonte:Cardoso (2020).

A gestão da manutenção, tradicionalmente focada na prevenção e correção de falhas, tem evoluído significativamente com a chegada da Indústria 4.0. Nesta nova era, o uso de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT) e a análise de big data, permite a monitorização em tempo real dos equipamentos. Isso possibilita a previsão de falhas antes que ocorram, promovendo a manutenção preditiva e reduzindo o tempo de inatividade (Lima; Silva, 2019).

Conforme Cardoso (2020), um dos pilares da Indústria 4.0 é a implementação do *Manufacturing Execution System* (MES), que vai além de um simples sistema de planejamento, como um ERP. O MES coordena e integra diversos aspectos da produção, desde a fabricação de peças até o controle de inventário, além de permitir a troca de ordens de fabricação e a gestão de recursos humanos, como contratações e demissões. Essa ferramenta também possibilita o ajuste de estoques e a programação de intervenções de manutenção, otimizando o uso de máquinas e recursos.

Silva (2018), a manutenção preditiva emerge como um dos principais avanços, permitindo que máquinas e sistemas fabris identifiquem em tempo real suas necessidades de manutenção, comunicando-se com os gestores para evitar falhas antes que elas ocorram. Isso representa uma mudança significativa em relação aos métodos tradicionais, que eram baseados na correção ou prevenção de falhas após sua ocorrência.

Além disso, conforme Mendes *et al.* (2024), a computação em nuvem desempenha um papel essencial na modernização da manutenção industrial, proporcionando armazenamento e acesso seguro a grandes volumes de dados. A nuvem elimina a necessidade de investimentos em infraestrutura física, como servidores locais, permitindo que as empresas armazenem e analisem dados de qualquer lugar, otimizando o controle e a eficiência dos processos.

Outro aspecto importante abordado por Alberto (2018) é a aplicação de realidade aumentada no setor de manutenção. Essa tecnologia oferece aos técnicos em campo a capacidade de receber instruções detalhadas diretamente em dispositivos móveis, tornando os procedimentos de manutenção mais ágeis e precisos. A realidade aumentada facilita a seleção de peças e o envio de procedimentos, contribuindo para a redução de erros e o aumento da confiabilidade das operações.

Cardoso (2020) destaca a importância do *Manufacturing Execution System* (MES), que integra diversos aspectos da produção e da manutenção. O MES permite uma coordenação mais eficiente dos recursos, reduzindo tempos de ciclo, otimizando o uso de estoques e equipamentos, e promovendo uma gestão integrada entre produção, manutenção e inventário.

Segundo Silva (2018), a manutenção preditiva é um dos pilares dessa nova era industrial, permitindo que as máquinas se comuniquem em tempo real com os gestores, informando suas condições e necessidades de reparo antes que ocorra uma falha crítica. Isso transforma o processo de manutenção, que passa a ser mais proativo e integrado às operações de produção, aumentando a eficiência e reduzindo o tempo de inatividade.

Além disso, Lima (2019) destaca que a introdução de tecnologias como computação em nuvem e Big Data permite uma análise mais profunda e contínua dos dados coletados pelas máquinas. A capacidade de armazenar e processar grandes volumes de informações possibilita o desenvolvimento de diagnósticos mais precisos e a identificação de padrões de comportamento das máquinas. Com isso, a manutenção preditiva e a otimização dos recursos tornam-se mais viáveis, alinhando-se com a fábrica inteligente, um dos princípios da Indústria 4.0.

Conforme Borlido (2017), a conectividade entre máquinas, operadores e sistemas de gestão é essencial para a integração dos processos de manutenção com o restante da cadeia produtiva. As fábricas inteligentes operam de forma autônoma, onde as máquinas interagem entre si e com os técnicos, promovendo uma gestão mais eficiente. Esse novo paradigma reforça o papel da manutenção como um fator estratégico no desempenho da indústria, garantindo não apenas a continuidade das operações, mas também a sua evolução em termos de produtividade e competitividade.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste estudo indicam que a Indústria 4.0 oferece um novo patamar de eficiência e flexibilidade para a gestão da manutenção. A convergência de tecnologias como IoT, inteligência artificial e big data está transformando os métodos tradicionais de manutenção, permitindo uma abordagem mais preditiva e automatizada. Essa evolução tecnológica promove uma gestão mais inteligente e eficaz dos ativos, otimizando recursos e minimizando falhas inesperadas.

Entretanto, a transição para essa nova realidade apresenta desafios, especialmente relacionados aos altos custos iniciais de implementação e à necessidade de capacitação técnica dos profissionais. Além disso, a infraestrutura de algumas empresas pode não estar totalmente preparada para a integração dessas tecnologias, o que requer investimentos e adaptações. Esses fatores limitantes podem retardar a adoção em larga escala da Indústria 4.0 na gestão da manutenção.

Apesar dos desafios, os benefícios são claros, incluindo a melhoria na precisão das intervenções de manutenção, a redução de tempos de inatividade e a maior longevidade dos equipamentos. Isso faz com que a transição para a Indústria 4.0 seja uma estratégia desejável para empresas que buscam manter-se competitivas e inovadoras no mercado.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de soluções mais acessíveis para pequenas e médias empresas, bem como o desenvolvimento de ferramentas que facilitem a adaptação de tecnologias da Indústria 4.0 em ambientes de infraestrutura limitada. Além disso, estudos podem focar na capacitação profissional necessária para otimizar o uso dessas novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, A.; Lima, T.D.F.M.; Charrua-Santos, F.M.B.; Santos, B.P. **Indústria 4.0: Desafios E Oportunidades**. Huambo, Angola, 2018 (Artigo, Universidade José Eduardo dos Santos).
- ALMEIDA, B. G.; FABRO, E. **Indústria 4.0 como ferramenta na engenharia de manutenção com base na metodologia TPM**. Scientia cum Industria, v. 7, n. 2, 2019.
- ASSAD NETO, A. et al. **A busca de uma identidade para a Indústria 4.0**. Brazilian Journal of Development, v. 4, n. 4, 2018.
- CARDOSO, D. E. R. Aplicação de conceitos de manutenção preditiva com aplicação de ferramentas de Inteligência Artificial. 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Porto, Porto, 2020.
- DANTAS, Igor Dos Santos. **Importância e Benefícios do Planejamento de Gestão de Manutenção**. 2019.
- DELECRODIO, P. V. A. et al. **A manutenção de ativos no contexto da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica e sistemática**. Exacta, v. 7, 2021. DOCKHORN, F. S. M. Manutenção 4.0 no contexto da Universidade de Brasília - UnB. 2019. 131 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- FREITAS, C. A. et al. A evolução da segurança no trabalho aplicada na manutenção industrial 4.0. **Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco**, v. 6, n. 2, 2020.
- GONCALVES, R. H. C. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2020.
- HERMANN, Mario; PENTTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design principles for industrie 4.0 scenarios. In: **2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)**. IEEE, 2016. p. 3928-3937.
- KLUG, William Dietrich et al. **Tecnologias da indústria 4.0 aplicadas no ambiente da gestão da manutenção**. 2023.
- LIMA, Elon Vieira; SILVA, Daniela dos Santos da, **O Planejamento E Controle Da Manutenção Na Indústria**



4.0. Ponta Grossa, 2019.

MENDES, David Samuel Fernandes Tavares et al. **Manutenção Lean em Ambiente de Indústria 4.0.** 2024.

RODRIGUES, João Carlos Canha Gravelho. **Digitalização de procedimentos LOTO para a consignação de equipamentos na indústria 4.0.** 2023. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, Beatrice Paiva et al. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SILVA FILHO, Luciano Costa da et al. Gestão Da Manutenção Na Indústria 4.0. **Revista Mythos**, v. 15, n. 1, p. 7-19, 2021.

SOUZA, Valdir Cardoso de et al. Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7063-7083, 2022.

VIANNINI, Rodrigo Araujo; MIRANDA JUNIOR, Hamilton Lopes de. **A manutenção industrial frente à indústria 4.0.** 2019



Resumo

Este artigo revisa criticamente a escolha de materiais utilizados na construção de estruturas aeronáuticas, com foco na viabilidade da substituição de materiais metálicos tradicionais por compósitos. O objetivo geral é investigar as vantagens dos compósitos em relação às ligas metálicas, ressaltando suas propriedades e aplicações na indústria aeronáutica. A metodologia empregada consistiu em uma revisão bibliográfica da literatura científica e técnica, abordando as principais ligas metálicas, suas melhorias por meio da adição de compósitos, e as tendências emergentes na seleção de materiais. A pesquisa identificou que os compósitos oferecem benefícios significativos, como a redução de peso e aumento da resistência, que são cruciais para atender às demandas de eficiência energética e sustentabilidade no setor. Contudo, foram observados desafios enfrentados pelos engenheiros na escolha dos materiais, considerando critérios como resistência, rigidez, durabilidade, custo e facilidade de fabricação. As conclusões apontam que os materiais compósitos se destacam como uma alternativa promissora, permitindo inovações no design de estruturas aeronáuticas. O estudo recomenda a continuidade de pesquisas experimentais e a exploração de novas tecnologias de fabricação e reciclagem de compósitos para aprimorar ainda mais suas aplicações na aviação.

Palavras-chave: Materiais Metálicos, Materiais Compósitos, Indústria Aeronáutica, Propriedades Mecânicas, Seleção de Materiais.

Abstract

This paper critically reviews the selection of materials used in the construction of aerospace structures, focusing on the feasibility of replacing traditional metallic materials with composites. The main objective is to investigate the advantages of composites over metallic alloys, highlighting their properties and applications in the aerospace industry. The methodology employed consisted of a literature review of scientific and technical sources, addressing key metallic alloys, their enhancements through composite addition, and emerging trends in material selection. The research identified that composites offer significant benefits, such as weight reduction and increased strength, which are crucial for meeting the energy efficiency and sustainability demands of the sector. However, challenges faced by engineers in material selection were noted, considering criteria such as strength, stiffness, durability, cost, and ease of manufacturing. The conclusions indicate that composite materials stand out as a promising alternative, enabling innovations in aerospace structure design. The study recommends the continuation of experimental research and the exploration of new manufacturing and recycling technologies for composites to further enhance their applications in aviation.

Keywords: Metallic Materials, Composite Materials, Aeronautical Industry, Mechanical Properties, Materials Selection.

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos têm desempenhado um papel cada vez mais relevante na indústria aeronáutica, oferecendo uma alternativa inovadora aos tradicionais materiais metálicos. Essa tendência é impulsionada pela busca contínua por aeronaves mais eficientes e seguras. Nesse contexto, esta revisão bibliográfica se concentra na análise crítica dos materiais compósitos e suas tecnologias, com ênfase nas aplicações específicas no setor aeronáutico. A indústria aeronáutica enfrenta desafios como a necessidade de reduzir o peso das aeronaves para melhorar a eficiência de combustível e minimizar outros impactos multidirecionados. Os materiais compósitos combinam fibras reforçadoras com uma matriz polimérica, oferecem uma solução promissora. É característico desses materiais únicos a alta resistência, baixa densidade e capacidade de moldagem em formas complexas.

Por meio desta revisão bibliográfica, explora-se teoricamente os principais materiais compósitos utilizados na construção de aeronaves e identifica-se os fatores que influenciam a escolha desses materiais. Além disso, busca-se compreender a evolução tecnológica que tem permitido a expansão das aplicações não aeronáuticas desses materiais. A análise crítica da literatura existente fornece compreensão para engenheiros, pesquisadores e profissionais do setor, e contribui para o avanço contínuo da indústria aeronáutica. Portanto, nesta revisão bibliográfica, busca-se aprimorar o conhecimento sobre os materiais compósitos e suas implicações no desenvolvimento de aeronaves mais eficientes e seguras.

Considerando a busca contínua por melhorias nas propriedades das estruturas aeronáuticas, como redução de peso e custos, aumento da segurança e desempenho, o problema de pesquisa é o seguinte: como otimizar a seleção de materiais para estruturas aeronáuticas, considerando as propriedades mecânicas sob diferentes condições de carregamento e ambiente, a fim de substituir os materiais metálicos tradicionais pelas vantagens oferecidas pelos materiais compósitos?

O principal objetivo desta Revisão Bibliográfica é abordar de forma crítica a escolha de materiais destinados à construção de estruturas aeronáuticas, com especial atenção para a viabilidade da substituição parcial ou integral dos materiais metálicos tradicionais pelos benefícios oferecidos pelos materiais compósitos. Para tanto, se faz como objetivos específicos: realizar uma revisão bibliográfica da literatura científica e técnica relacionada às principais ligas metálicas de uso aeronáutico e às suas melhorias por adições de materiais compósitos, de modo a abordar as principais propriedades de ambas as classes de materiais; identificar tendências emergentes na indústria aeronáutica quanto a escolha de materiais e os desafios enfrentados pelos engenheiros na busca por soluções mais eficientes, e analisar os critérios utilizados na seleção de materiais, como resistência, rigidez, durabilidade, custo e facilidade de fabricação, com base nas evidências disponíveis na literatura; e explorar as possíveis aplicações dos materiais compósitos em estruturas aeronáuticas, considerando suas características únicas de baixa massa específica e alta resistência.

Os materiais compósitos desempenham um papel crucial na indústria aeronáutica, e sua relevância transcende os limites dos laboratórios de pesquisa e das linhas de produção. A seleção desses materiais não só afeta diretamente o desempenho e a segurança das aeronaves, mas também exerce influência sobre a sustentabilidade ambiental e a economia global. Assim, a análise minuciosa da literatura especializada sobre materiais compósitos é essencial para o progresso no âmbito da engenharia aeronáutica. A relevância desta pes-

quisa reside em vários aspectos. Primeiramente, os materiais compósitos oferecem uma oportunidade única de otimizar a relação entre resistência e peso nas estruturas aeronáuticas. Ao substituir parcial ou totalmente os materiais metálicos tradicionais, pode-se reduzir o consumo de combustível, diminuir as emissões de gases de efeito estufa e contribuir para um transporte aéreo mais sustentável. Assim, é de suma importância revisar a abrangência tecnológica dos materiais compósitos na indústria aeronáutica. Além disso, a pesquisa sobre tais materiais tem implicações práticas para a indústria.

Compreender as propriedades mecânicas desses materiais em diferentes cenários de carga e ambiente é essencial para projetar aeronaves mais eficientes e seguras. A aplicação bem-sucedida de materiais compósitos pode resultar em economias significativas de custos operacionais e manutenção, beneficiando companhias aéreas, fabricantes e passageiros. Esta pesquisa contribuirá para a sociedade ao promover a inovação tecnológica na indústria aeronáutica. A utilização eficiente de materiais compósitos pode melhorar a segurança dos voos, reduzir o impacto ambiental e fortalecer a competitividade global das empresas do setor. Além disso, os resultados desta pesquisa serão valiosos para a comunidade acadêmica, fornecendo compreensões para futuros projetos de engenharia, desenvolvimento de normas e regulamentos, e formação de profissionais capacitados na área de materiais aeroespaciais.

2. FORMATAÇÃO GERAL

2.1 Metodologia

Esta pesquisa não explorou aspectos experimentais, hipóteses ou estudos de caso, concentrando-se exclusivamente na análise crítica e síntese de trabalhos já existentes na literatura especializada. Portanto, a metodologia adotada para esta pesquisa consistiu em uma Revisão Bibliográfica, enquadrando-se como uma abordagem qualitativa e descritiva. O objetivo primordial ao adotar-se o método de pesquisa citado foi examinar livros, dissertações e artigos científicos pertinentes ao tema, selecionados por meio de buscas em bibliotecas virtuais, repositórios institucionais online de universidades, periódicos especializados e bases de dados específicas, como SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), ScienceDirect, Google Acadêmico e o Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Preferencialmente, o período contemplado na pesquisa abrangeu os últimos 10 anos, sendo assim, esta pesquisa se fundamentou em obras datadas entre os anos 2014 e 2024, garantindo a atualidade e relevância das fontes consultadas. Porém, em minoria, obras externas ao período determinado foram consideradas segundo também sua credibilidade e relevância. As palavras-chave utilizadas para nortear a pesquisa incluíram termos como “Materiais Metálicos”, “Materiais Compósitos”, “Indústria Aeronáutica”, “Propriedades Mecânicas” e “Seleção de Materiais”, visando à identificação de materiais relevantes para a elaboração de uma revisão abrangente e fundamentada.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Materiais Compósitos com Matriz Metálica (CMM)

Compósitos são mistura de materiais que combinam diversas características como força, resistência, dureza e flexibilidade, que geralmente são desafiadoras de alcançar in-

dividualmente por um único material. A matriz transfere a carga aplicada para a estrutura de reforço, que confere a resistência mecânica aos compósitos. Os materiais de reforço podem ser partículas ou fibras, sendo os compósitos com reforço de partículas preferidos devido ao menor custo e facilidade de processamento. As propriedades dos compósitos são influenciadas pela composição da matriz, do material de reforço e pelo método de fabricação (Sharma; Mahant; Upadhyay, 2020). A Figura 1 esquematiza a obtenção básica de um material compósito.

Os compósitos de matriz metálica (CMM) são reconhecidos como materiais de alta relação resistência/peso, apresentando vantagens em relação aos materiais monolíticos como a alta resistência específica e módulo, propriedades aprimoradas em altas temperaturas, baixo coeficiente de expansão térmica, melhor condutividade elétrica, resistência a desgastes e abrasão, entre outras. Esses materiais encontram ampla aplicação em setores como lazer e esportes, defesa, transporte ferroviário e marítimo, automotivo, exploração espacial, embalagens, eletrônicos, infraestrutura e outros campos de aplicação (Moona *et al.*, 2018; Nturanabo; Masu; Kirabira, 2019; Sharma; Mahant; Upadhyay, 2020; Bhoi; Singh; Pratap, 2020).

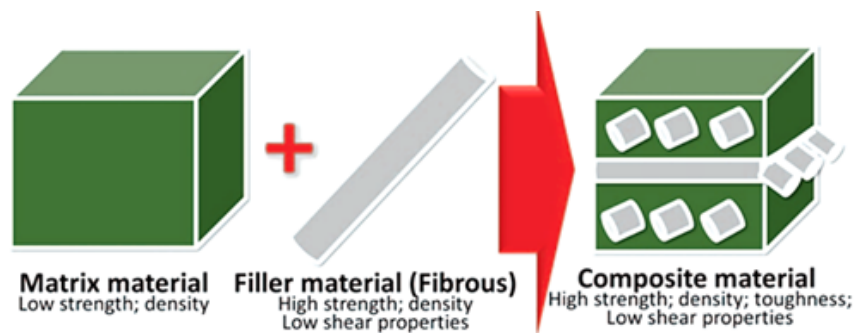


Figura 1. Esquema de configuração de um material compósito

Fonte: Kausar (2023, p. 5)

Tomando-se como amostra literária importante os estudos de Selvakumar e Narayanasamy (2016), Mistry e Gohil (2017), Joseph, Kumaragurubaran e Sathish (2019), Mavhungu *et al.* (2017) e Idusuyi e Olayinka (2019), pode-se afirmar que, nos CMM, elementos como alumínio (Al), magnésio (Mg) e titânio (Ti) são largamente empregados como a matriz, combinados com materiais de reforço como óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), carbetos de silício (SiC), carbetos de boro (B_4C), carbetos de titânio (TiC), nitreto de silício (Si_3N_4), nitreto de alumínio (AlN), óxido de zircônio ou zircônia (ZrO_2), óxido de ítrio (Y_2O_3), diboreto de titânio (TiB_2), entre outros. Os CMM de Al se destacam em setores como aeroespacial, automotivo e defesa, devido à sua excelente relação resistência/peso, além de apresentarem boa resistência à corrosão e desempenho tribológico.

A obtenção de uma microestrutura livre de defeitos e uma distribuição uniforme das armaduras são fatores cruciais na fabricação de CMM. A presença de reforços cerâmicos rígidos em CMM pode resultar na redução da tenacidade e da ductilidade da matriz metálica, o que limita suas aplicações. Uma abordagem para contornar esse problema é a produção de compósitos de matriz metálica superficial. Esses compósitos oferecem excelentes propriedades superficiais, ao mesmo tempo em que preservam a tenacidade e a ductilidade da matriz metálica em comparação com os CMM tradicionais (Rana *et al.*, 2018; Sharma; Mahant; Upadhyay, 2020).

2.2.2 Tendências e Critérios de Seleção de Materiais Aeronáuticos

Tem sido observado um grande impulso na pesquisa e desenvolvimento de uma nova geração de materiais destinados à aplicação na indústria aeronáutica. Esse esforço é impulsionado pela busca por redução de custos, prolongamento da vida útil das peças das aeronaves, e aprimoramento da eficiência do combustível, capacidade de carga e alcance de voo. Dentro desse contexto, destacam-se classes importantes de materiais mais selecionados nesse setor como os CMM e materiais metálicos como aços, ligas à base de Ti, de Al e de Mg, além de superligas de níquel (Ni). As ligas de Al têm sido os materiais dominantes na indústria aeronáutica. No entanto, o panorama está evoluindo rapidamente, como indica-se na Tabela 1. Devido à sua excelente relação entre resistência e peso, assim como a resistência à corrosão, as ligas de Ti estão ganhando destaque na fabricação de peças estruturais de aeronaves. Já as superligas à base de Ni, bifásicas, são comumente utilizadas na fabricação de componentes de motores aeronáuticos, como pás e rotores, operando na faixa de temperatura mais elevada (Gloria *et al.*, 2019). A Tabela 1 apresenta os materiais de estrutura primária usados por peso em aeronaves de fabricação Boeing. A partir desses dados, fica claro que os compósitos estão desempenhando um papel cada vez mais significativo.

Série Boeing	Ligas de Al	Ligas de Ti	Aços	Compósitos	Outros
747	81	4	13	1	1
757	78	6	12	3	1
767	80	2	14	3	1
777	70	7	11	11	1
787	20	15	10	50	5

Tabela 1. Composição dos materiais utilizados em aeronaves Boeing (em porcentagem de peso)

Fonte: GLORIA *et al.* (2019)

Conforme Luo e Sadayappan (2011) e Luo (2013), o Mg é reconhecido como o metal mais leve utilizado em aplicações estruturais, caracterizando-se por sua notável estabilidade, boa fluidez e menor tendência à porosidade por hidrogênio (H) em comparação com outros metais fundidos, como ligas de Al. Por sua vez, os aços de ultra-alta resistência também são amplamente empregados na fabricação de diversos itens aeronáuticos como trens de pouso, fuselagens, componentes de turbinas, cones de hélice, fixadores, molas, parafusos e eixos. Entretanto, observa-se uma tendência crescente de substituição desses materiais por compósitos (Ćwiek, 2010).

As seções estruturais de uma aeronave de transporte são submetidas a condições típicas de carga, e os requisitos específicos incluem propriedades de engenharia como módulo elástico, resistência à compressão, resistência à tração, capacidade de resistência a danos (como fadiga e crescimento de trincas por fadiga), tenacidade à fratura e resistência à corrosão. A seleção do material é determinada pelo tipo de componente em questão, levando em consideração condições específicas de tensão, restrições geométricas, ambiente de operação, processos de fabricação e manutenção necessários (Gloria *et al.*, 2019).

Os materiais da estrutura de uma aeronave devem suportar o peso estático da aeronave, bem como as cargas dinâmicas decorrentes de manobras, decolagens, pousos e turbulências. Devem também possuir densidades relativamente baixas para redução de peso, além de propriedades mecânicas adequadas para suas funções específicas. Outro requisito essencial é a capacidade de resistir a danos, garantindo a integridade estrutural

diante de condições extremas de temperatura, umidade e radiação ultravioleta (Huda; Edi, 2013).

2.2.3 Materiais Compósitos em Estruturas Aeronáuticas

As aeronaves Boeing 787, Bombardier C-Series e Airbus A350 são feitas com bastante compósito PRF (polímero reforçado com fibra), com uma quantidade de 50%, 47% e 53% em peso, respectivamente (Giurgiutiu, 2016; Bachmann; Hidalgo; Bricout, 2017; Tadini *et al.*, 2017). A Figura 2 evidencia o aumento exponencial da importância dos materiais compósitos na aviação comercial de passageiros.

Na indústria aeronáutica, é comum o uso de laminados de fibra metálica em estruturas de painéis da fuselagem superior, enquanto os compósitos de PRF de carbono são empregados nas caixas de asas, painéis de asa e estabilizadores das aeronaves (Aamir *et al.*, 2019). Além disso, drones e veículos aéreos não tripulados estão sendo cada vez mais fabricados utilizando compósitos de PRF (Hassanalian; Abdelkefi, 2017; Hassanalian; Rice; Abdelkefi, 2018).

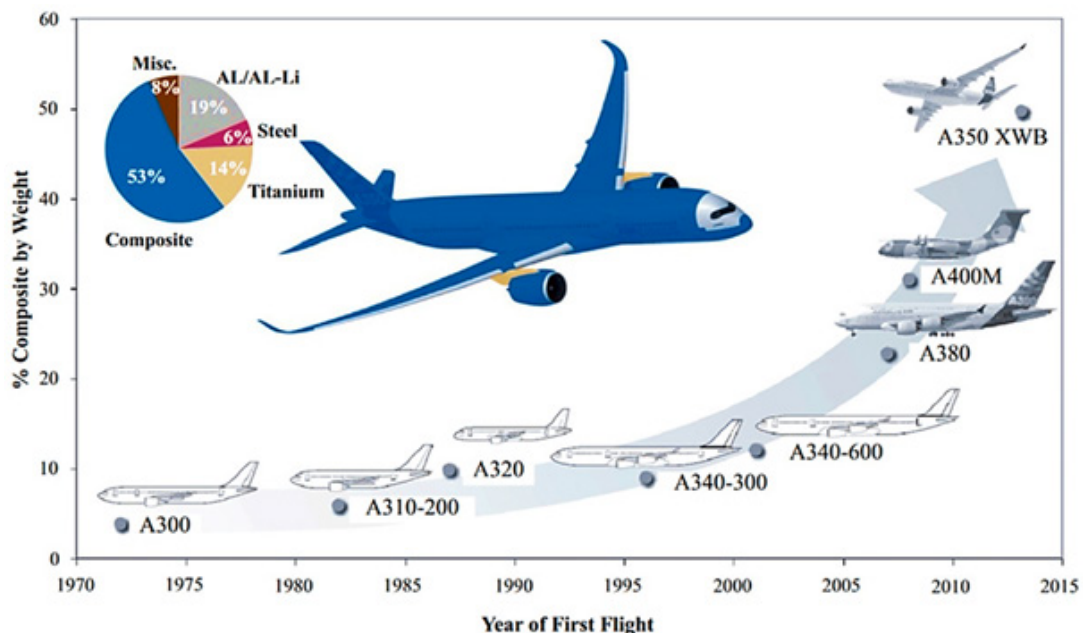


Figura 2. Materiais compósitos em aeronaves de fabricação Airbus

Fonte: Trzepieciński *et al.* (2021)

Assim, em análise da Figura 2, e sob as perspectivas de autores como Giurgiutiu (2016), Bachmann, Hidalgo e Bricout (2017), Tadini *et al.* (2017), Aamir *et al.* (2019), Hassanalian e Abdelkefi (2017) Hassanalian, Rice e Abdelkefi (2018), fica evidente que a incorporação de materiais compósitos nas estruturas aeronáuticas não apenas atende às demandas de eficiência e desempenho, mas também representa um marco na evolução da engenharia aeronáutica. A crescente proporção desses materiais em novas aeronaves reflete um compromisso da indústria com a inovação e a sustentabilidade, visando não apenas a redução de peso, mas também a otimização do consumo de combustível e a melhoria nas propriedades mecânicas. Essa tendência é complementada pela exploração de aplicações em plataformas emergentes, como drones, que aproveitam as vantagens dos compósitos para maximizar a eficiência operacional.

2.2.4 Discussões Integradas: Otimização na Seleção de Materiais para Estruturas

A análise literária dos CMM revela sua importância crescente na indústria aeronáutica, conforme discutido pelos autores Moona *et al.* (2018) e Sharma *et al.* (2020). A revisão de literatura realizada destaca que a combinação de Al, Mg e Ti como matrizes, com reforços cerâmicos como Al_2O_3 e SiC, proporciona benefícios significativos em comparação com os materiais metálicos tradicionais. No entanto, é crucial considerar que a presença de reforços rígidos pode comprometer a tenacidade e ductilidade da matriz metálica, um aspecto que Rana *et al.* (2018) enfatizam como um desafio que a indústria ainda precisa superar.

Ademais, a pesquisa de Gloria *et al.* (2019) apontam a evolução nas classes de materiais utilizados na indústria aeronáutica, com um destaque crescente para ligas de Ti e superligas de Ni, que têm se tornado opções viáveis devido à sua resistência à corrosão e propriedades mecânicas em altas temperaturas. Essa mudança é corroborada pela crescente participação de compósitos nas estruturas primárias das aeronaves Boeing, evidenciando a tendência de substituição dos materiais metálicos tradicionais por compósitos. Isso reflete diretamente o problema de pesquisa proposto, que buscou saber como otimizar a seleção de materiais, reconhecendo as vantagens dos compósitos em relação à redução de peso e custos, bem como ao aumento da segurança e desempenho.

A relevância dos materiais compósitos em estruturas aeronáuticas é ainda mais evidenciada pelo uso em aeronaves como o Boeing 787 e o Airbus A350, onde a porcentagem de compósitos atinge valores significativos, conforme Giurgiutiu (2016) e Tadini *et al.* (2017). Essa adoção não apenas melhora a eficiência do combustível, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, um fator crucial no cenário atual da aviação comercial. A análise de Huda e Edi (2013) sobre as propriedades mecânicas dos materiais em condições extremas também complementa essa discussão, sublinhando a necessidade de que os materiais utilizados em estruturas aeronáuticas atendam a rigorosos requisitos de resistência e durabilidade.

No entanto, a pesquisa ainda enfrenta limitações, como a necessidade de mais estudos experimentais que confirmem as propriedades dos compósitos sob diferentes condições de carregamento e ambiente. Além disso, a integração de novos materiais, como as ligas de Mg e os aços de ultra-alta resistência, que são reconhecidos por sua leveza e estabilidade, como apontado por Ćwiek (2010), sugere que a indústria está em um caminho de constante evolução e adaptação. As implicações das descobertas indicam que, embora haja um forte movimento em direção ao uso de compósitos, ligas metálicas ainda desempenham um papel importante, especialmente em aplicações que exigem alta resistência a danos e estabilidade sob condições extremas.

Em suma, a combinação das análises dos autores estudados sugere que, para otimizar a seleção de materiais para estruturas aeronáuticas, é fundamental considerar as propriedades mecânicas dos compósitos, suas vantagens em relação aos materiais metálicos e os desafios que ainda precisam ser superados. A pesquisa apresentada neste trabalho contribui para a compreensão das tendências atuais e das necessidades futuras da indústria, ressaltando a importância de uma abordagem crítica e integrada na seleção de materiais para a engenharia aeronáutica.

3. CONCLUSÃO

O principal objetivo desta Revisão Bibliográfica foi abordar de forma crítica a escolha de materiais destinados à construção de estruturas aeronáuticas, enfatizando a viabilidade da substituição parcial ou integral dos materiais metálicos tradicionais pelos benefícios

oferecidos pelos materiais compósitos. Ao longo da pesquisa, foram discutidas as principais ligas metálicas utilizadas na indústria aeronáutica, bem como as melhorias que podem ser alcançadas por meio da adição de compósitos, destacando as propriedades distintas de ambas as classes de materiais.

Os objetivos propostos foram alcançados de forma satisfatória. A revisão bibliográfica evidenciou que os materiais compósitos apresentam vantagens significativas em relação aos metais, como a redução de peso e aumento da resistência, sendo essenciais para atender às exigências de eficiência energética e sustentabilidade na aviação. A análise das tendências emergentes revelou que os engenheiros enfrentam desafios na escolha de materiais, particularmente em relação à resistência, rigidez, durabilidade, custo e facilidade de fabricação. Essa compreensão é vital para orientar decisões que garantam a segurança e a eficiência das estruturas aeronáuticas.

Além disso, a exploração das possíveis aplicações dos materiais compósitos nas estruturas aeronáuticas demonstrou que suas características únicas, como baixa massa específica e alta resistência, abrem novas possibilidades de design e inovação. No entanto, algumas limitações foram identificadas durante a pesquisa, como o acesso restrito a dados específicos de projetos industriais, o que impede uma análise mais abrangente das aplicações práticas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos experimentais que validem as propriedades dos compósitos em condições reais de operação na indústria aeronáutica. Também é aconselhável investigar novas tecnologias de fabricação e reciclagem de compósitos, assim como a combinação de diferentes materiais para otimizar características específicas.

Em suma, os materiais compósitos emergem como uma solução promissora para a construção de estruturas aeronáuticas, proporcionando uma alternativa viável e eficiente em comparação com os materiais metálicos tradicionais. A continuidade dos estudos e investimentos nesse campo é fundamental para garantir que a aviação avance em direção a um futuro mais sustentável e inovador.

REFERÊNCIAS

AAMIR, Muhammad. et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: A review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, p. 2289-2308, 2019.

BACHMANN, Jens; HIDALGO, Carme; BRICOUT, Stéphanie. Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector – A life cycle assessment review. **Science China Technological Sciences**, v. 60, p. 1301-1317, 2017.

BHOI, Neeraj K.; SINGH, Harpreet; PRATAP, Saurabh. Developments in the aluminum metal matrix composites reinforced by micro/nano particles – a review. **Journal of Composite Materials**, v. 54, n. 6, p. 813-833, 2020.

ĆWIEK, J. Prevention methods against hydrogen degradation of steel. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 43, n. 1, p. 214-221, 2010.

GLORIA, Antonio. et al. Alloys for aeronautic applications: State of the art and perspectives. **Metals**, v. 9, n. 6, p. 662, 2019.

GIURGIUTIU, Victor. Chapter 1—introduction. **Structural Health Monitoring of Aerospace Composites**, p. 1-23, 2016.

HASSANALIAN, Mostafa; ABDELKEFI, Abdessattar. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. **Progress in Aerospace sciences**, v. 91, p. 99-131, 2017.

HASSANALIAN, Mostafa; RICE, D.; ABDELKEFI, A. Evolution of space drones for planetary exploration: A re-



view. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 97, p. 61-105, 2018.

HUDA, Zainul; EDI, Prasetyo. Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 46, p. 552-560, 2013.

IDUSUYI, Nosa; OLAYINKA, John I. Dry sliding wear characteristics of aluminium metal matrix composites: a brief overview. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 3, p. 3338-3346, 2019.

JOSEPH, J. D.; KUMARAGURUBARAN, B.; SATHISH, S. Effect of MoS₂ on the wear behavior of Aluminium (AlMg0.5Si) composite. *Silicon* 12: 1–9. 2019.

KAUSAR, Ayesha. **Polymeric nanocomposites with carbonaceous nanofillers for aerospace applications**. Woodhead Publishing, 2022. 372 p.

LUO, Alan A. Magnesium casting technology for structural applications. **Journal of Magnesium and Alloys**, v. 1, n. 1, p. 2-22, 2013.

LUO, A. A.; SADAYAPPAN, K. Technology for Magnesium Castings. **American Foundry Society, Schaumburg, IL**, p. 29-47, 2011.

MAVHUNGU, S. T. et al. Aluminum matrix composites for industrial use: advances and trends. **Procedia Manufacturing**, v. 7, p. 178-182, 2017.

MISTRY, Jitendra M.; GOHIL, Piyush P. An overview of diversified reinforcement on aluminum metal matrix composites: Tribological aspects. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 231, n. 3, p. 399-421, 2017.

MOONA, Girija. et al. Aluminium metal matrix composites: a retrospective investigation. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, v. 56, p. 164-175, 2018.

NTURANABO, Francis; MASU, Leonard; KIRABIRA, John Baptist. Novel applications of aluminium metal matrix composites. **Aluminium alloys and composites**, 2019.

RANA, H. et al. Strategical parametric investigation on manufacturing of Al–Mg–Zn–Cu alloy surface composites using FSP. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 33, n. 5, p. 534-545, 2018.

SELVAKUMAR, N.; NARAYANASAMY, P. Optimization and effect of weight fraction of MoS₂ on the tribological behavior of Mg–TiC–MoS₂ hybrid composites. **Tribology Transactions**, v. 59, n. 4, p. 733-747, 2016.

SHARMA, Daulat Kumar; MAHANT, Devang; UPADHYAY, Gautam. Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. **Materials Today: Proceedings**, v. 26, p. 506-519, 2020.

TADINI, Pietro. et al. Thermal degradation analysis of innovative PEKK-based carbon composites for high-temperature aeronautical components. **Aerospace Science and technology**, v. 65, p. 106-116, 2017.

TRZEPICINSKI, Tomasz. et al. New advances and future possibilities in forming technology of hybrid metal–polymer composites used in aerospace applications. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 8, p. 217, 2021.

Resumo

Este artigo aborda a investigação do potencial dos nanofluidos para melhorar a eficiência térmica em comparação aos fluidos tradicionais, enfocando suas propriedades e aplicações. O objetivo geral foi avaliar como os nanofluidos podem contribuir para uma gestão térmica mais eficiente em setores críticos, como a geração de energia e o resfriamento de componentes eletrônicos. A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão da literatura existente, que incluiu análises das propriedades termofísicas dos nanofluidos e sua capacidade de superar as limitações dos fluidos convencionais. Os resultados evidenciam que os nanofluidos oferecem vantagens significativas, como maior condutividade térmica e redução da queda de pressão, apontando para seu potencial transformador na transferência de calor. No entanto, o estudo também revela desafios, como a necessidade de modelos preditivos mais precisos e a coleta de dados experimentais em condições variadas. As considerações finais sugerem a importância de pesquisas futuras que integrem métodos experimentais e computacionais, além de promover uma colaboração mais intensa entre universidades e a indústria. Essas ações são essenciais para impulsionar a adoção e o desenvolvimento dos nanofluidos, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade em diversos contextos.

Palavras-chave: Nanofluidos, Propriedades Termofísicas, Transferência de Calor, Caracterização de Nanofluidos.

Abstract

This article explores the potential of nanofluids to enhance thermal efficiency compared to traditional fluids, focusing on their properties and applications. The general objective was to assess how nanofluids can contribute to more efficient thermal management in critical sectors, such as power generation and the cooling of electronic components. The research was conducted through a review of existing literature, including analyses of the thermophysical properties of nanofluids and their ability to overcome the limitations of conventional fluids. The findings highlight that nanofluids offer significant advantages, such as higher thermal conductivity and reduced pressure drop, underscoring their transformative potential in heat transfer applications. However, the study also identifies challenges, such as the need for more accurate predictive models and the collection of experimental data under varied conditions. The concluding considerations suggest the importance of future research integrating experimental and computational methods, as well as fostering closer collaboration between academia and industry. These actions are essential for driving the adoption and development of nanofluids, contributing to energy efficiency and sustainability across various contexts.

Keywords: Nanofluids, Thermophysical Properties, Heat Transfer, Nanofluid Characterization.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções eficientes de transferência de calor em diversas áreas industriais e tecnológicas tem impulsionado o interesse em materiais avançados, com propriedades termofísicas melhoradas. Advindo disso, os nanofluidos têm emergido como uma classe de fluidos inovadores. Nos últimos anos, o campo da engenharia térmica tem sido palco de um crescente interesse em materiais avançados que possam aprimorar a eficiência dos sistemas de transferência de calor. Entre esses materiais, os nanofluidos se destacam como uma alternativa promissora devido às suas propriedades termofísicas singulares. Os nanofluidos são suspensões coloidais compostas por nanopartículas dispersas em um líquido base, e essa combinação confere a eles características únicas, tais como alta condutividade térmica e capacidade calorífica específica. Essas propriedades distintas têm despertado o interesse de pesquisadores e engenheiros em várias áreas, incluindo refrigeração, aquecimento e troca de calor em sistemas industriais e domésticos.

Compreender profundamente as características termofísicas dos nanofluidos é crucial para explorar todo o seu potencial em aplicações práticas. Nesse contexto, o presente estudo propõe uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema, com ênfase especial nas propriedades termofísicas dos nanofluidos. Serão abordados vários aspectos, incluindo os métodos de medição utilizados para avaliar essas propriedades e os fatores que afetam seu comportamento térmico, como a concentração de nanopartículas, o tamanho das partículas e o tipo de líquido base. A revisão bibliográfica abordou as aplicações dos nanofluidos em transferência de calor, destacando seu potencial para melhorar a eficiência energética e o desempenho de sistemas de refrigeração, aquecimento e troca de calor em uma variedade de contextos industriais e tecnológicos. Por fim, por meio dessa análise crítica, buscou-se contribuir para o avanço do conhecimento nesta área e fornecer percepções significativas para pesquisadores, engenheiros e profissionais que trabalham com tecnologias de transferência de calor baseadas em nanofluidos.

A escolha do tema dos nanofluidos e suas propriedades termofísicas para investigação bibliográfica é motivada pela crescente demanda por soluções eficientes de transferência de calor em diversos setores industriais e tecnológicos. A importância desse tema reside no potencial dos nanofluidos em oferecer melhorias significativas na eficiência dos sistemas de refrigeração, aquecimento e troca de calor, contribuindo assim para a otimização de processos industriais e redução de custos. Além disso, a investigação das propriedades termofísicas dos nanofluidos é fundamental para a compreensão mais profunda desses materiais e sua aplicação em diversas áreas, incluindo eletrônica, medicina, energia e meio ambiente. Portanto, a pesquisa sobre nanofluidos não apenas preenche uma lacuna no conhecimento científico, mas também oferece oportunidades para o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações inovadoras.

Os contextos social e acadêmico dessa pesquisa são preenchidos por contribuições significativas que podem ser providenciadas ao longo de sua realização e que podem se traduzir tanto no avanço do conhecimento científico quanto na promoção de subsídios para soluções práticas de desafios contemporâneos. Ao compreender melhor as propriedades termofísicas dos nanofluidos e suas aplicações em transferência de calor, espera-se contribuir para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, beneficiando assim a sociedade como um todo. Além disso, o compartilhamento dos resultados desta pesquisa pode enriquecer o corpo de conhecimento acadêmico, estimular futuras investigações e promover avanços na área de engenharia térmica e materiais.



Nos últimos anos, a busca por soluções eficientes de transferência de calor tem sido uma prioridade em diversos setores industriais e tecnológicos. Os nanofluidos surgem como uma alternativa promissora devido às suas propriedades termofísicas únicas. Embora haja um interesse crescente em explorar o potencial dos nanofluidos em aplicações de transferência de calor, ainda existem lacunas significativas no entendimento de como suas propriedades termofísicas podem ser otimizadas para atender às demandas específicas de diferentes aplicações. Diante desse cenário, o problema de pesquisa que orientou este estudo foi o seguinte: como as propriedades termofísicas dos nanofluidos podem ser mais bem compreendidas e manipuladas para otimizar seu desempenho em sistemas de transferência de calor?

O objetivo geral deste estudo consistiu em aprofundar o entendimento dos nanofluidos no que tange suas propriedades, caracterizações e aplicações voltadas à transferência de calor. Para isso, como objetivos específicos, estudou-se o conceito de nanofluidos, explicou-se como são fabricados, e forneceu-se uma visão geral sobre os diferentes tipos de nanopartículas e líquidos-base usados na sua produção. Descreveram-se as propriedades termofísicas dos nanofluidos, compreendendo-se suas influências e como poderiam ser afetadas, além de abordarem-se os métodos experimentais e computacionais da literatura utilizados para medi-las e caracterizá-las. Reuniram-se estudos que apontaram diversas aplicações dos nanofluidos em transferência de calor, discutindo-se os benefícios e desafios associados a cada aplicação.

2. FORMATAÇÃO GERAL

2.1 Metodologia

A metodologia empregada neste estudo consistiu numa Revisão Bibliográfica, que é uma pesquisa qualitativa e descritiva. Este método envolveu a análise e síntese de informações provenientes de fontes bibliográficas relevantes, incluindo livros, artigos científicos e outras publicações acadêmicas. A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados online, como o Catálogo de Teses CAPES, Scielo e *Google Scholar*, bem como em bibliotecas virtuais de universidades e instituições de pesquisa renomadas. O período preferencial dos artigos pesquisados foi limitado aos últimos 10 anos, datados entre 2014 e 2024. Porém, a revisão bibliográfica assumiu exceções ao período presencial estipulado, significando ressaltar que algumas publicações externas a esse período foram escolhidas devido sua importância, indispensabilidade e/ou pioneirismo. Todavia, essas publicações tenderam a ser minorias bibliográficas externas ao intervalo dos últimos 10 anos para que a atualidade da abordagem proposta não fosse diminuída.

Os descritores utilizados na busca foram seletos de acordo com os principais aspectos do tema, como “nanofluidos”, “propriedades termofísicas”, “transferência de calor”, “caracterização de nanofluidos”, entre outros pertinentes. Esses descritores foram combinados de forma a refletir os objetivos específicos da pesquisa e garantir a abrangência da busca por literatura relevante. Após a coleta bibliográfica, foi realizada uma análise crítica dos conteúdos encontrados, destacando as informações relevantes relacionadas às propriedades termofísicas dos nanofluidos e suas aplicações em transferência de calor. Essa análise foi utilizada para fundamentar as discussões e conclusões propostas neste estudo, colaborando para a compreensão mais abrangente do tema.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Nanofluidos: Produção Científica e Avanços em Transferência de Calor

Apesar da crescente importância dos nanofluidos na ciência e na engenharia, as pesquisas conduzidas no Brasil não têm acompanhado o avanço internacional nesse campo. Embora reconhecidos por suas amplas aplicações, especialmente em processos de transferência de calor, os estudos brasileiros sobre nanofluidos ainda são escassos e têm contribuído de forma limitada para o desenvolvimento global dessa tecnologia (Flores, 2016).

A produção científica no Brasil entre os anos de 2010 e 2015 foi pouco expressiva, como ilustrado na Figura 1, que compara a produção nacional com a mundial. Durante esse período, o número de estudos publicados no Brasil não ultrapassou quatro por ano, enquanto o volume de publicações globais ultrapassou a marca de 1000 por ano, demonstrando um crescimento exponencial e um forte interesse internacional. Esse contraste é significativo, pois indica que, enquanto outros países têm investido pesadamente em pesquisas sobre nanofluidos, ampliando o conhecimento e propondo novas aplicações tecnológicas, o Brasil permanece em um ritmo quase estacionário (Flores, 2016).

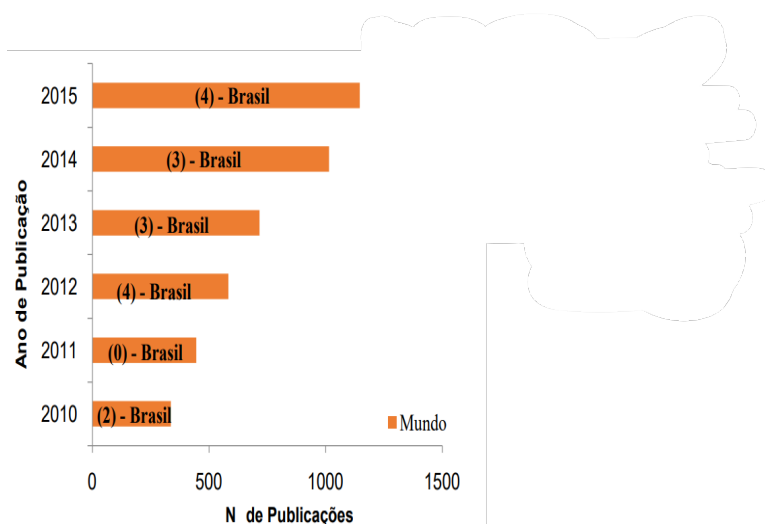


Figura 1. Quantidade de publicações referentes ao tema nanofluidos

Fonte: Adaptado de Flores (2016, p. 4)

Esse cenário reflete tanto a falta de investimento e incentivo à pesquisa científica no país quanto a necessidade de maior articulação entre universidades, centros de pesquisa e a indústria para impulsionar o desenvolvimento nacional nessa área. Assim, o Brasil ainda tem um grande caminho a percorrer para acompanhar o dinamismo e a inovação que vêm marcando a pesquisa global sobre nanofluidos, o que reforça a urgência de ampliar esforços para mudar essa realidade e explorar o potencial desse campo no contexto brasileiro (Flores, 2016).

A utilização de partículas sólidas suspensas em água, como as de dimensões microscópicas, visando ampliar suas propriedades termofísicas ou otimizar a taxa de transferência de calor, remonta a um campo de estudo de longa data. Seu surgimento remonta à publicação de Maxwell no final do século XIX. No entanto, emprego de partículas em escala microscópica acarreta certas desvantagens como: aumento de queda de pressão, restringindo sua aplicação; sedimentação (as partículas tendem a se assentar com o passar do tempo, o que reduz sua eficácia térmica), obstrução (devido ao tamanho das partículas, os canais têm propensão a obstruir-se, sobretudo em canais de resfriamento estreitos); e

problemas de condutividade térmica (esta é diretamente proporcional à concentração de partículas, porém pode agravar os problemas anteriores) (Oliveira *et al.*, 2023).

Uma alternativa para manter uma boa condutividade térmica sem os problemas mencionados é o uso de nanofluidos, isto é, suspensão de partículas nanométricas (1-100 nm) em fluidos convencionais, tornando essa composição superior aos fluidos convencionais em termo de condutividade térmica (Costa *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2023).

Os nanofluidos, uma classe inovadora e emergente no campo da Engenharia, são caracterizados pela dispersão de nanomateriais, como partículas, tubos, fibras, fios e folhas em escala nanométrica, em fluidos base, tais como etilenoglicol, água, óleos e líquidos iônicos. Essencialmente, os nanofluidos são coloides em nanoescala que incorporam nanomateriais em suas composições. Esses sistemas são inicialmente bifásicos, consistindo de uma fase sólida nanométrica e de um fluido base, que, quando dispersos de forma homogênea, formam uma mistura estável com propriedades significativamente diferenciadas das apresentadas por seus componentes isolados (Costa *et al.*, 2018).

Entre as características mais promissoras dos nanofluidos está o aumento substancial da condutividade térmica, o que os posiciona como uma alternativa tecnologicamente avançada e potencialmente superior aos fluidos tradicionais utilizados para a transferência de calor. Devido a essas propriedades otimizadas, os nanofluidos vêm sendo amplamente estudados para aplicações em que a eficiência térmica é essencial, como em trocadores de calor, onde seu desempenho superior já aponta para uma transformação nos métodos convencionais de controle térmico (Costa *et al.*, 2018).

2.2.2 Condutividade Térmica de Nanofluidos: Estudos e Experimentos

Ao longo dos anos, vários tipos de nanofluidos foram estudados quanto a suas respectivas capacidades de condução térmica, tais como a pequena amostra literária destacada adiante, que reúne experimentos e simulação computacional. Quanto aos procedimentos experimentais para aferir a condutividade térmica dos nanofluidos, Xuan e Li (2000) experimentaram determinar a condutividade térmica de nanofluidos à base de cobre e água, bem como cobre e óleo. Para o nanofluido à base de cobre e água, a concentração volumétrica atingida foi de 2,5% e 78% de aumento da condutividade térmica. Para o nanofluido à base de cobre e óleo, atingiu-se concentração volumétrica de 7,5% e aumento da condutividade térmica de 24%.

Murshed *et al.* (2005) investigaram a condutividade térmica dos nanofluidos de dióxido de titânio/água deionizada em uma concentração volumétrica de 5%, observando um incremento de 33% em comparação ao fluido base. Em outro estudo, Leong *et al.* (2006) abordaram uma película em escala nanométrica como um dos principais mecanismos para elevar a condutividade térmica dos nanofluidos, cujos resultados foram confrontados com informações experimentais já existentes. Além disso, Rocha *et al.* (2015) investigaram nanofluidos à base de água de alumina e dióxido de zircônio, em concentrações volumétricas de 0,01%, 0,05% e 0,1%, concluindo que a concentração volumétrica, o tamanho/forma das partículas e a temperatura são fatores críticos a serem considerados.

Costa *et al.* (2018) conduziram uma investigação numérica sobre a eficiência energética de trocadores de calor do tipo casco e tubo utilizando o método de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A partir da análise das temperaturas e taxas de fluxo de água e grafeno como fluido de trabalho, eles determinaram o desempenho energético dos trocadores, considerando o grafeno como nanofluido. O estudo incluiu uma avaliação

comparativa do desempenho energético do trocador de calor quando operado com água e grafeno como fluidos de trabalho.

Propriedades termofísicas importantes em aplicações de transferência de calor envolvendo nanofluidos são: viscosidade dinâmica, calor específico e massa específica. Dado que a condutividade térmica é fundamental para a transferência de calor e nenhum modelo atualmente consegue prever adequadamente a condutividade térmica dos nanofluidos, é crucial obter mais dados experimentais para aprofundar a compreensão desse fenômeno físico (Oliveira *et al.*, 2023).

2.2.3 Avanços e Desafios na Predição da Condutividade Térmica de Nanofluidos

Os nanofluidos são formados pela dispersão de nanopartículas em fluidos tradicionais, um conceito inovador introduzido por Choi e Eastman (1995), que estabeleceu um marco nas pesquisas sobre materiais avançados. Desde então, a engenharia de nanofluidos tem experimentado avanços notáveis, impulsionando o progresso da nanotecnologia e das ciências de superfície. Desde meados da década de 1990, uma vasta gama de nanofluidos foi desenvolvida, utilizando uma diversidade de nanopartículas, como óxidos metálicos, carbonetos e nanotubos, além de métodos de preparação que vão desde a homogeneização até a agitação mecânica.

Essa evolução é corroborada por uma série de estudos recentes que destacam as diferentes abordagens e aplicações dos nanofluidos, incluindo pesquisas de Fotovvat *et al.* (2022), Kobayashi *et al.* (2022), Mori *et al.* (2022) e Wang *et al.* (2022). Essas investigações demonstram não apenas a capacidade de personalizar as propriedades térmicas e fluidas dos nanofluidos, mas também sua crescente relevância em áreas como eficiência energética, resfriamento de componentes eletrônicos e transferência de calor em sistemas industriais, evidenciando o potencial transformador desses materiais no cenário tecnológico contemporâneo.

Os fluidos convencionais de transferência de calor, como água, etilenoglicol e óleo mineral, desempenham um papel crucial em diversos setores industriais, abrangendo desde a geração de energia até o resfriamento de componentes microeletrônicos (Flores, 2016). Esses fluidos são amplamente utilizados devido à sua disponibilidade e custo acessível, mas apresentam uma limitação significativa: sua condutividade térmica é relativamente baixa. Isso significa que, embora possam transferir calor, não o fazem de maneira tão eficiente quanto desejável, especialmente em aplicações que requerem uma gestão térmica mais eficaz. Diante dessa limitação, surgem iniciativas contínuas voltadas à pesquisa e ao desenvolvimento de fluidos térmicos que possuam uma eficácia energética superior (Ghozatloo; Rashidi; Shariaty-Niassar, 2014).

O objetivo dessas investigações é não apenas reduzir o consumo de energia, mas também aprimorar a eficiência dos processos industriais, tornando-os mais sustentáveis e econômicos. A busca por alternativas mais eficazes, como os nanofluidos, representa um avanço significativo nesse campo, pois esses novos materiais têm mostrado potencial para superar as limitações dos fluidos tradicionais, proporcionando melhor desempenho em sistemas de transferência de calor (Ghozatloo; Rashidi; Shariaty-Niassar, 2014).

Atualmente, a comunidade científica investe considerável esforço na elaboração de modelos confiáveis que possam prever o comportamento térmico dos nanofluidos. Essa busca é impulsionada pela complexidade intrínseca do fenômeno, uma vez que diversos

parâmetros influenciam diretamente a condutividade térmica desses materiais (Oliveira *et al.*, 2023).

Fatores como a concentração das nanopartículas, a temperatura do fluido, o tamanho e a forma das partículas, bem como as interações entre elas e o fluido base, são apenas alguns dos elementos que tornam a modelagem uma tarefa desafiadora. Apesar dos avanços e das numerosas tentativas de modelagem, estudos realizados por Lamas *et al.* (2014) revelam que, até o presente momento, nenhum modelo foi capaz de prever com precisão a condutividade térmica de diferentes nanopartículas em suspensão. Essa situação destaca as dificuldades contínuas que os pesquisadores enfrentam na busca por uma compreensão mais profunda e na modelagem do comportamento térmico complexo desses materiais em escala nanométrica. A necessidade de dados experimentais adicionais e a formulação de teorias mais abrangentes tornam-se essenciais para superar esses desafios e avançar no campo dos nanofluidos.

2.2.4 Discussão

A discussão dos resultados obtidos neste estudo sobre nanofluidos revela importantes implicações e nuances que merecem ser exploradas à luz da literatura existente e das teorias predominantes no campo. Primeiramente, os avanços nas pesquisas sobre nanofluidos, iniciados por Choi e Eastman (1995), demonstram um crescimento significativo no entendimento das propriedades e aplicações desses materiais em comparação com os fluidos tradicionais de transferência de calor. Isso é especialmente notável em setores que requerem uma gestão térmica eficiente, como a geração de energia e o resfriamento de componentes microeletrônicos (Flores, 2016).

Um dos achados mais significativos deste estudo foi a identificação das limitações dos fluidos convencionais, que, apesar de sua ampla utilização, não conseguem atender adequadamente às exigências de eficiência energética. Como discutido por Ghazatloo, Rashidi e Shariaty-Niassar (2014), a busca por fluidos térmicos com maior eficácia energética não apenas visa reduzir o consumo de energia, mas também aprimorar a eficiência dos processos industriais, o que se alinha com as diretrizes globais de sustentabilidade.

A análise das propriedades termofísicas dos nanofluidos revela uma complexidade que ainda precisa ser desvendada. A busca por modelos confiáveis que prevejam o comportamento térmico desses fluidos, como enfatizado por Oliveira *et al.* (2023), é um desafio que a comunidade científica ainda enfrenta. A dificuldade em modelar com precisão a condutividade térmica das nanopartículas em suspensão, conforme destacado por Lamas *et al.* (2014), sugere que a compreensão atual é limitada e que são necessários mais dados experimentais para fundamentar teorias e práticas. A interdependência de fatores como concentração de nanopartículas, temperatura e formas das partículas complica ainda mais essa tarefa. Essa complexidade ressalta a importância de um enfoque multidisciplinar nas pesquisas futuras, incorporando técnicas experimentais e computacionais que possam oferecer uma compreensão mais robusta dos fenômenos envolvidos.

Adicionalmente, as pesquisas realizadas no Brasil em comparação com as tendências globais evidenciam um contraste preocupante. A baixa produção científica brasileira entre 2010 e 2015, conforme apresentado por Flores (2016), reflete uma necessidade urgente de investimento e incentivo à pesquisa científica nesta área. O cenário atual, onde o Brasil ainda se encontra em um ritmo quase estacionário em relação às inovações globais sobre nanofluidos, aponta para a necessidade de maior articulação entre universidades, centros de pesquisa e a indústria. Essa colaboração é crucial para que o país possa não apenas

acompanhar as tendências internacionais, mas também explorar o potencial transformador dos nanofluidos em contextos locais.

Por outro lado, um aspecto a ser considerado é a crítica feita ao uso de partículas em escala microscópica, que apresentam limitações como aumento da queda de pressão e sedimentação, conforme descrito por Oliveira *et al.* (2023). Os nanofluidos surgem como uma solução promissora, superando muitos dos desafios associados ao uso de partículas maiores, como evidenciado por Costa *et al.* (2018). A abordagem inovadora dos nanofluidos não apenas melhora a condutividade térmica, mas também representa um avanço nas tecnologias de transferência de calor, podendo levar a novas aplicações e métodos.

Contudo, é importante reconhecer as limitações e pontos fracos nos resultados apresentados. A falta de modelos preditivos precisos e a necessidade de mais dados experimentais, como destacado por Lamas *et al.* (2014), podem afetar a validade das conclusões atuais. Além disso, os desafios enfrentados na coleta e análise de dados em condições variáveis, conforme discutido por Oliveira *et al.* (2023), ressaltam a complexidade da pesquisa em nanofluidos. A interpretação desses resultados deve ser feita com cautela, levando em consideração a variabilidade dos materiais e métodos utilizados nas investigações.

Em suma, os resultados deste estudo corroboram a ideia de que os nanofluidos têm um potencial transformador na eficiência térmica e nas aplicações de transferência de calor. No entanto, ainda há um longo caminho a percorrer para se alcançar um entendimento abrangente e fundamentado sobre suas propriedades e comportamentos. As descobertas atuais ressaltam a necessidade de mais pesquisas e colaborações interdisciplinares, que poderão fomentar a inovação e impulsionar a tecnologia dos nanofluidos, tanto no Brasil quanto no cenário global.

3. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou investigar o potencial dos nanofluidos na melhoria da eficiência térmica e na transferência de calor, com o objetivo de identificar suas propriedades e aplicações em comparação aos fluidos tradicionais. Ao longo da pesquisa, foi possível perceber que os nanofluidos apresentam vantagens significativas, como a redução da queda de pressão e a melhoria na condutividade térmica, tornando-se uma solução promissora para setores que exigem uma gestão térmica eficiente. Assim, os objetivos propostos foram em grande parte alcançados, evidenciando o papel dos nanofluidos como uma alternativa viável para enfrentar os desafios energéticos contemporâneos.

Entretanto, é importante reconhecer que nem todos os aspectos foram completamente desvendados. A complexidade das propriedades termofísicas dos nanofluidos ainda representa um desafio considerável, dificultando a formulação de modelos preditivos precisos. As limitações enfrentadas na coleta e análise de dados experimentais, assim como a variabilidade das condições em que os nanofluidos são aplicados, podem ter impactado a profundidade das conclusões tiradas neste estudo. Portanto, uma compreensão mais abrangente requereria mais dados e investigações adicionais.

Neste sentido, recomenda-se que futuros estudos se concentrem na padronização dos métodos de pesquisa, possibilitando comparações mais eficazes entre diferentes trabalhos. Além disso, a realização de investigações que integrem abordagens experimentais e computacionais poderá fornecer insights mais robustos sobre o comportamento térmico dos nanofluidos. A colaboração entre universidades e indústrias também se revela crucial para acelerar a inovação nesta área e explorar plenamente as potencialidades dos



nanofluidos em aplicações práticas.

Em suma, enquanto este estudo contribui para a discussão sobre o uso de nanofluidos, ele também aponta para a necessidade de um esforço contínuo e colaborativo na pesquisa. A compreensão aprofundada das propriedades e comportamentos dos nanofluidos será fundamental para a adoção generalizada dessas soluções no futuro, contribuindo para a eficiência energética e a sustentabilidade em diversos setores.

REFERÊNCIAS

CHOI, Stephen U. S.; EASTMAN, Jeffrey A. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States), 1995. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/196525>. Acesso em: 16 mar. 2024.

COSTA, J. A. P. *et al.* **Simulação computacional de trocadores de calor casco e tubo utilizando nanofluido como fluido de trabalho**. In: VI Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, 2018, Tucumán. CAIM 2018. Tucumán: Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, 2018. v. 1.

FLORES, Marcelo Costa. **Investigação experimental das propriedades termofísicas e da convecção forçada de nanofluido de grafeno**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

FOTOVAT, B. *et al.* Anti-corrosion performance and mechanical properties of epoxy coatings containing microcapsules filled with linseed oil and modified ceria nanoparticles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 648, p. 129157, 2022.

GHOZATLOO, Ahmad; RASHIDI, Alimorad; SHARIATY-NIASSAR, Mojtaba. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 53, p. 136-141, 2014.

KOBAYASHI, Yukina *et al.* Development of methods for fabricating nanoparticles composed of magnetite, gold, and silica toward diagnostic imaging. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 643, p. 128773, 2022.

LAMAS, Bruno *et al.* Critical analysis of the thermal conductivity models for CNT based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 78, p. 65-76, 2014.

LEONG, K. C.; YANG, C.; MURSHED, S. M. S. A model for the thermal conductivity of nanofluids—the effect of interfacial layer. **Journal of nanoparticle research**, v. 8, p. 245-254, 2006.

MORI, Takamasa *et al.* Thickening of aqueous nanoparticle suspension using DC electric field. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 648, p. 129387, 2022.

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. Enhanced thermal conductivity of TiO₂—water based nanofluids. **International Journal of thermal sciences**, v. 44, n. 4, p. 367-373, 2005.

OLIVEIRA, Alexandre Melo *et al.* Experimental Evaluation of Thermal Conductivity and Other Thermophysical Properties of Nanofluids Based on Functionalized (-OH) Mwcnt Nanoparticles Dispersed in Distilled Water. **Advances in Nanoparticles**, v. 12, n. 01, p. 32-52, 2023.

ROCHA, Marcelo S.; CABRAL, E. L. L.; SABUNDJIAN, G. Thermophysical characterization of Al₂O₃ and ZrO₂ nanofluids as emergency cooling fluids of future generations of nuclear reactors. In: **2015 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Nice**. 2015. p. 3-6.

XUAN, Yimin; LI, Qiang. Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of heat and fluid flow**, v. 21, n. 1, p. 58-64, 2000.

WANG, Dong *et al.* Construction of NIR etchable nanoparticles via co-assembly strategy for appointed delivery. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 648, p. 129395, 2022.

Resumo

O presente artigo investiga os impactos da Manufatura Inteligente na eficiência e adaptabilidade dos processos de produção nas indústrias brasileiras. O objetivo geral é analisar como a implementação de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas e sistemas ciberfísicos, pode otimizar as operações industriais. A metodologia utilizada envolve uma revisão bibliográfica abrangente, complementada por estudos de caso em empresas que adotaram essas práticas. Os resultados demonstram que a adoção da Manufatura Inteligente pode levar a melhorias significativas em termos de produtividade e flexibilidade, embora desafios como a resistência à mudança e a necessidade de capacitação da força de trabalho sejam barreiras a serem superadas. As considerações finais ressaltam a importância de investimentos em tecnologia e na formação de colaboradores para maximizar os benefícios dessas inovações. Além disso, são apontadas limitações relacionadas à amostra restrita analisada, sugerindo que pesquisas futuras explorem diferentes setores e regiões do Brasil. Este estudo contribui para o entendimento do papel da Manufatura Inteligente na competitividade da indústria nacional, propondo a necessidade de políticas públicas que incentivem a modernização e a formação contínua dos profissionais.

Palavras-chave: Processos de Fabricação, Manufatura Inteligente, Tecnologias na Produção Mecânica, Automação Industrial.

Abstract

This paper investigates the impacts of Smart Manufacturing on the efficiency and adaptability of production processes in Brazilian industries. The main objective is to analyze how the implementation of emerging technologies, such as the Internet of Things and cyber-physical systems, can optimize industrial operations. The methodology used involves a comprehensive literature review, complemented by case studies of companies that have adopted these practices. The results show that the adoption of Smart Manufacturing can lead to significant improvements in productivity and flexibility, although challenges such as resistance to change and the need for workforce training are barriers that must be overcome. The concluding remarks emphasize the importance of investing in technology and workforce development to maximize the benefits of these innovations. Additionally, limitations related to the restricted sample analyzed are noted, suggesting that future research should explore different sectors and regions of Brazil. This study contributes to the understanding of the role of Smart Manufacturing in the competitiveness of the national industry, proposing the need for public policies that encourage modernization and continuous professional development.

Keywords: Manufacturing Processes, Smart Manufacturing, Technologies in Mechanical Production, Industrial Automation.

1. INTRODUÇÃO

A modernização na produção mecânica tem ocupado um papel central no cenário industrial contemporâneo, impulsionada por avanços tecnológicos que fomentam a transição para práticas mais eficientes e inteligentes. Dentro desse contexto, a introdução da Manufatura Inteligente emerge como um ponto de inflexão crucial, representando a convergência de tecnologias digitais e automação que redefine os paradigmas tradicionais de fabricação. Essa transformação não se limita apenas a uma atualização tecnológica; trata-se de uma revolução que redefine fundamentalmente a abordagem das empresas em relação aos processos de produção mecânica. Nesse contexto, compreende-se que a aplicação da Manufatura Inteligente não é apenas uma resposta estratégica às demandas crescentes por flexibilidade, agilidade e eficiência, mas também uma reconfiguração completa do modo como as organizações concebem e implementam suas operações industriais.

Este estudo consistiu em uma revisão bibliográfica detalhada dos impactos da Manufatura Inteligente na transição tecnológica dos processos de fabricação mecânica. Esta pesquisa abrangeu não apenas as oportunidades oferecidas por essas tecnologias, mas também os desafios inerentes a essa transformação. Considerando-se a relevância da modernização na indústria, esta revisão bibliográfica visou elucidar as implicações práticas da Manufatura Inteligente. A análise baseou-se na síntese de estudos existentes, permitindo uma compreensão aprofundada dos mecanismos pelos quais a Manufatura Inteligente remodela a produção mecânica e influencia as estratégias industriais contemporâneas. Dessa forma, este trabalho buscou contribuir para o entendimento consolidado dos desenvolvimentos atuais nesse campo dinâmico, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas na indústria.

A modernização na produção mecânica através da implementação da Manufatura Inteligente representa um tema de grande importância no cenário industrial contemporâneo. A transição para práticas mais eficientes e inteligentes é vital para atender às crescentes demandas por agilidade, flexibilidade e qualidade nos processos de fabricação. A relevância desse tema reside na necessidade de compreender como as tecnologias emergentes podem ser aplicadas de maneira eficaz para otimizar a produção mecânica, maximizando a eficiência operacional e garantindo a competitividade das organizações na indústria. No contexto específico deste estudo, a relevância se destaca ao explorar e analisar criticamente os impactos da Manufatura Inteligente. A compreensão detalhada desses impactos é crucial para orientar as estratégias das empresas, permitindo que se beneficiem plenamente das inovações tecnológicas disponíveis. Este estudo contribui para o avanço do conhecimento científico na área de engenharia mecânica, proporcionando uma base teórica sólida para futuras investigações e desenvolvimentos.

Destacando as contribuições para a sociedade e a comunidade acadêmica, a pesquisa tem o potencial de oferecer conhecimentos importantes para a otimização dos processos de fabricação, o que pode resultar em uma produção mais eficiente e sustentável. Ao disseminar conhecimentos técnicos sobre a implementação da Manufatura Inteligente, a pesquisa também contribuirá para a formação de profissionais capacitados a enfrentar os desafios contemporâneos da indústria mecânica. Portanto, este estudo visou não apenas responder às questões específicas levantadas, mas também enriquecer o corpo de conhecimento disponível e promover avanços significativos no campo da engenharia mecânica.

No atual contexto da indústria mecânica, a modernização dos processos de fabricação



é uma necessidade premente, impulsionada pelas constantes evoluções tecnológicas e pela busca incessante por maior eficiência e competitividade. A introdução da Manufatura Inteligente, caracterizada pela integração de tecnologias digitais e automação avançada, emerge como uma promissora resposta para atender a essas demandas. A convergência de sensores, análise de dados em tempo real e conectividade tem o potencial de transformar radicalmente a maneira como a produção mecânica é concebida e executada. Diante desse cenário de transição tecnológica, o problema de pesquisa que norteou este trabalho de revisão bibliográfica foi: como a implementação da Manufatura Inteligente impacta a eficiência e a adaptabilidade dos processos de fabricação mecânica?

O problema de pesquisa que estimulou este estudo se refletiu no objetivo principal de pesquisa, que foi analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os impactos da implementação da Manufatura Inteligente na eficiência e adaptabilidade dos processos de fabricação mecânica, visando compreender os benefícios e desafios associados a essa transição tecnológica. De maneira mais detalhada, especificou-se os seguintes subobjetivos: realizar uma revisão detalhada da literatura existente sobre Manufatura Inteligente, abrangendo estudos que evidenciem suas aplicações, benefícios e desafios específicos na produção mecânica; identificar os principais indicadores de eficiência e adaptabilidade utilizados na avaliação de processos de fabricação mecânica sob a influência da Manufatura Inteligente, destacando as métricas mais relevantes; e analisar estudos referentes à implementação da Manufatura Inteligente em ambientes industriais, investigando os resultados obtidos e as práticas adotadas, visando a extração de conhecimentos relevantes para otimizar a aplicação dessa tecnologia nos processos de produção mecânica.

2. FORMATAÇÃO GERAL

2.1 Metodologia

O presente estudo adotou uma abordagem metodológica de Revisão Bibliográfica, enquadrando-se como uma pesquisa qualitativa e descritiva. A pesquisa bibliográfica foi conduzida por meio da revisão e análise crítica de livros, dissertações e artigos científicos selecionados. Para a coleta de materiais pertinentes, serão exploradas bases de dados específicas, incluindo a base Google Acadêmico e a Scielo, Periódicos CAPES, entre outras, que abrangeram amplamente a literatura acadêmica relacionada ao tema de Manufatura Inteligente na produção mecânica. O período de inclusão dos artigos nesta revisão foi restrito aos trabalhos publicados nos 10 anos passados até o vigente ano de 2024, para garantir uma abordagem atualizada e relevante para a compreensão dos avanços recentes no campo. As palavras-chave utilizadas nos filtros de busca foram principalmente “Manufatura Inteligente”, “Tecnologias na Produção Mecânica”, “Automação Industrial”, entre outras, conforme se deu a necessidade de refinamento da busca.

2.2 Resultados e Discussão

As tecnologias de informação e comunicação desempenham um papel crucial nos sistemas de manufatura modernos. O avanço contínuo em sistemas cibernéticos e tecnologias inteligentes resultou no surgimento de big data, Indústria 4.0, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, sistemas ciberfísicos e na próxima geração de inteligência artificial. Diversos paradigmas avançados de manufatura foram propostos, utilizando esses conceitos para aprimorar processos e sistemas de produção com um alto grau de in-

teligência. Recentemente, grandes nações têm enfatizado a importância de transformar e modernizar seus setores manufatureiros, destacando a relevância da digitalização, da conectividade e da inteligência nos processos industriais. Pesquisadores acadêmicos e profissionais da indústria se referem à manufatura inteligente como a integração profunda entre manufatura e tecnologias avançadas de informação e cibernética (Wang *et al.*, 2021).

A evolução tecnológica na manufatura se apresenta como uma resposta aos desafios impostos pela Indústria 4.0. Segundo Arbix *et al.* (2017), os sistemas de manufatura estão em rápida transformação nos países desenvolvidos. Embora seu futuro seja incerto, as novas ferramentas e características introduzidas por essa evolução já têm reestruturado diversos setores da economia. Esse processo tem promovido o reposicionamento de empresas que mais investem em inovação e possuem maior intensidade de conhecimento.

A manufatura avançada envolve a incorporação da inteligência artificial em todas as fases operacionais dos processos de produção. Com essa integração, as máquinas ganham a capacidade de tomar decisões autônomas, determinando de forma independente o momento ideal para iniciar e interromper a produção. Isso resulta em uma operação mais eficiente, permitindo a otimização do consumo de energia e a minimização de desperdícios. Além de reduzir custos operacionais, essa abordagem também promove a sustentabilidade, pois os sistemas podem ajustar suas atividades em tempo real com base em dados de desempenho e demandas variáveis (Chaves, 2022).

De acordo com a Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos – FEIMEC (2016), a implementação da manufatura avançada no Brasil enfrenta um desafio significativo. Uma grande parcela das indústrias brasileiras ainda opera com maquinário antiquado, que pode ser comparado aos equipamentos utilizados durante a Segunda Revolução Industrial. Esta defasagem tecnológica dificulta a modernização e a integração de novas tecnologias de manufatura avançada, como a automação inteligente e a IoT, essenciais para competir no cenário global atual. A atualização do parque industrial é crucial para que o Brasil possa adotar plenamente os princípios da Indústria 4.0, aumentando a eficiência, reduzindo custos e melhorando a competitividade das empresas no mercado internacional.

O cenário da manufatura moderna é altamente competitivo. Para prosperar neste ambiente, as empresas de manufatura devem aumentar sua eficiência, flexibilidade e capacidade de inovação na produção de seus bens. Esse objetivo pode ser alcançado aproveitando os benefícios oferecidos pela Advanced Manufacturing Technology (AMT). A adoção dessas tecnologias permite que as organizações otimizem seus processos, melhorem a qualidade dos produtos e respondam de maneira mais ágil às demandas do mercado (Nath; Sarkar, 2017).

A Indústria 4.0, seguindo a visão alemã, e a Advanced Manufacturing, conforme denominada nos Estados Unidos, representam um novo marco nas transformações industriais. Esses conceitos sinalizam a emergência de novas interações entre seres humanos, máquinas, e a inteligência fornecida por softwares e algoritmos. Eles visam criar uma sinergia avançada, onde a integração tecnológica aprimora a eficiência e a produtividade nos processos de manufatura (Chaves, 2022).

Segundo Sangeetha *et al.* (2018), nos últimos anos, a IoT tornou-se uma das tecnologias mais populares e amplamente utilizadas em setores como manufatura avançada, engenharia, automóveis, eletrônica e medicina. Os paradigmas de fabricação têm desempenhado papéis cruciais na indústria moderna. Nas últimas duas décadas, novos sistemas de produção baseados em paradigmas avançados, como a personalização em massa, a fabricação reconfigurável, a manufatura sustentável e a produção orientada a serviços, foram desenvolvidas para superar o modelo tradicional de “produção em massa”. Esses



novos paradigmas visam atender às demandas atuais de flexibilidade, sustentabilidade e personalização, permitindo às indústrias adaptar-se rapidamente às mudanças do mercado e às necessidades específicas dos clientes (Xia *et al.*, 2018).

É essencial que as fábricas busquem migrar para os paradigmas avançados de fabricação para assegurar sua competitividade. A capacidade de adaptação e inovação é uma característica fundamental dos processos evolutivos, seja no desenvolvimento de linguagens, ecossistemas, sistemas tecnológicos ou aspectos sociais (Taalbi, 2020).

A manufatura avançada emprega tecnologias emergentes, como inteligência artificial, IoT e fabricação aditiva, para impulsionar não apenas a competitividade econômica de empresas individuais, mas também para promover a sustentabilidade de todo o setor industrial. Essas tecnologias possibilitam a otimização de processos, redução de desperdícios, aumento da eficiência energética e melhor gerenciamento de recursos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento de práticas industriais mais responsáveis (Jin *et al.*, 2017). Esses mesmos estudiosos observam que os avanços em materiais e tecnologias demandam a adoção de novos métodos de produção e modelos analíticos para controle de processos e otimização de parâmetros, considerando aspectos como custo, confiabilidade, qualidade, flexibilidade do produto, consumo de energia e emissões de carbono.

Ao longo dos anos, a rápida industrialização global resultou em melhorias na qualidade de vida, mas também teve um impacto adverso significativo no meio ambiente. Isso tem levado as organizações a investir na reformulação de processos e produtos, buscando torná-los mais sustentáveis e inteligentes. Diversos países implementaram recentemente iniciativas locais para impulsionar o desenvolvimento e a adoção das tecnologias associadas à Indústria 4.0. Na Alemanha, berço desse conceito, foi lançada a “Estratégia de Alta Tecnologia 2020”, nos Estados Unidos surgiu a “Parceria de Fabricação Avançada”, na China foi estabelecido o “Made in China 2025” e na França foi lançado o “La Nouvelle France Industrielle” (Chaves, 2022).

Esses programas são concebidos para alavancar os princípios fundamentais da Indústria 4.0, promovendo a interconectividade e conferindo inteligência aos sistemas de produção. Além disso, eles visam integrar as operações da fábrica ao ciclo de vida completo do produto e às atividades da cadeia de suprimentos, resultando em mudanças significativas na forma como as pessoas trabalham (Chaves, 2022).

Para Roblek, Meško e Krapež (2016), a manifestação da nova era da transformação industrial digital, reconhecida como Indústria 4.0, juntamente com a adoção de práticas de fabricação inteligente, está reconfigurando os processos de negócios. A revolução tecnológica requerida pela fabricação inteligente está promovendo mudanças substanciais nos princípios subjacentes à criação e entrega de valor no cenário da manufatura (Lu; Weng, 2018).

Nos últimos anos, a manufatura aditiva experimentou um crescimento rápido, revelando um enorme potencial de economia de energia e produção ambientalmente mais limpa devido à redução no consumo de materiais e recursos, além de outros requisitos de ferramentas (Majeed *et al.*, 2021). Esses pesquisadores destacam que, nesta era contemporânea, com os avanços nas tecnologias de fabricação, tanto a academia quanto a indústria têm demonstrado um maior interesse na manufatura inteligente, buscando benefícios que tornem a produção mais sustentável e eficiente.

Ao discutir os resultados bibliográficos encontrados neste estudo sobre a implementação da Manufatura Inteligente e seus impactos na eficiência e adaptabilidade dos processos de fabricação mecânica, revela-se uma evolução contínua em direção à digitalização e

automação dos sistemas produtivos. Com base nos resultados analisados, pode-se afirmar que a Manufatura Inteligente, de fato, potencializa esses dois aspectos críticos – eficiência e adaptabilidade – no setor mecânico. A literatura sugere, segundo Wang *et al.* (2021) que a integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e sistemas ciberfísicos desempenha um papel essencial na modernização da manufatura.

Como resultado, empresas que adotaram esses paradigmas avançados de manufatura, conforme descrito por Chaves (2022), experimentaram uma transformação significativa nos processos produtivos, onde as máquinas são capazes de tomar decisões autônomas, otimizando o consumo de energia e minimizando o desperdício. Esse é um ponto central que evidencia que os impactos na eficiência estão fortemente relacionados à capacidade de automação e controle inteligente dos processos, algo que responde diretamente ao problema de pesquisa e ao objetivo geral de avaliar os impactos da Manufatura Inteligente.

A revisão bibliográfica também destaca que o conceito de Indústria 4.0 promove uma maior adaptabilidade dos processos produtivos, permitindo que as indústrias ajustem rapidamente suas operações conforme as demandas do mercado (Nath; Sarkar, 2017). A FEI-MEC (2016), no entanto, revela que, no Brasil, essa modernização enfrenta um obstáculo significativo: muitas indústrias ainda operam com maquinário obsoleto, o que dificulta a plena implementação das tecnologias da Indústria 4.0. Embora esse seja um desafio importante, as empresas que conseguiram atualizar seu parque industrial observaram melhorias evidentes na capacidade de adaptação e inovação, como esperado nos objetivos específicos da pesquisa.

Outro ponto revelado por este estudo é o contraste entre os benefícios e os desafios da Manufatura Inteligente. Chaves (2022) e Sangeetha *et al.* (2018) enfatizam que a sustentabilidade e a eficiência energética são aspectos cruciais que essas tecnologias proporcionam, algo que é apontado como uma vantagem estratégica para empresas que buscam reduzir custos operacionais e aumentar sua competitividade no mercado global. Contudo, conforme sugerido por Arbix *et al.* (2017), países em desenvolvimento, como o Brasil, enfrentam dificuldades relacionadas à infraestrutura tecnológica defasada. Isso limita a capacidade dessas empresas de adotar plenamente as soluções inteligentes, destacando a relevância dos desafios abordados nos subobjetivos da pesquisa.

Ao comparar esses resultados com a literatura internacional, observa-se que as nações desenvolvidas, como Alemanha e Estados Unidos, têm avançado rapidamente na implementação da Manufatura Avançada, enquanto países emergentes ainda estão lutando para superar barreiras tecnológicas (Xia *et al.*, 2018; Majeed *et al.*, 2021).

A “Estratégia de Alta Tecnologia 2020” da Alemanha e a “Parceria de Fabricação Avançada” dos Estados Unidos são exemplos de como a adoção de paradigmas avançados de manufatura pode transformar a indústria, promovendo a interconectividade e inteligência nos processos produtivos (Chaves, 2022). Essas iniciativas resultam em uma abordagem mais coordenada para otimizar os processos de fabricação e, em última análise, fortalecer a competitividade industrial.

Um ponto que merece destaque é que, embora os resultados da pesquisa corroborem a eficácia da Manufatura Inteligente na melhoria dos processos, Taalbi (2020) sugere que a capacidade de inovação e adaptação desses sistemas pode ser limitada por fatores externos, como políticas governamentais e investimentos em infraestrutura. No contexto brasileiro, a defasagem tecnológica ainda é uma barreira significativa, o que pode restringir os benefícios completos da implementação da Indústria 4.0 a curto prazo.

Os resultados obtidos permitiram responder com clareza ao problema de pesquisa proposto. A discussão dos resultados da revisão bibliográfica sobre Manufatura Inteligente

evidencia a profunda transformação dos processos de fabricação mecânica, alinhando-se de forma significativa aos objetivos e ao problema de pesquisa propostos. O principal objetivo da pesquisa foi avaliar os impactos da Manufatura Inteligente na eficiência e adaptabilidade dos processos de produção. A literatura revisada, incluindo os estudos de Wang *et al.* (2021) e Chaves (2022), confirma que a adoção de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT) e sistemas ciberfísicos, tem o potencial de modernizar os processos produtivos, melhorando a eficiência operacional. Os autores destacam que a automação proporcionada por essas tecnologias não apenas otimiza o consumo de recursos, mas também minimiza desperdícios, abordando diretamente a questão central que investiga quais aspectos da Manufatura Inteligente potencializam a eficiência nas operações industriais.

Ademais, a análise dos resultados em relação à adaptabilidade das indústrias diante das novas demandas de mercado revela que empresas que implementam práticas de Manufatura Inteligente demonstram maior agilidade na adaptação de suas operações às flutuações do mercado (Nath; Sarkar, 2017). Esta capacidade de resposta rápida é fundamental em um ambiente competitivo, onde a inovação se torna um diferencial estratégico. Os objetivos específicos da pesquisa, como a identificação de oportunidades de melhoria nas operações, foram abordados, evidenciando que a Manufatura Inteligente promove uma cultura organizacional mais flexível e inovadora. Os achados sugerem que a digitalização não apenas transforma as dinâmicas operacionais, mas também impulsiona a reconfiguração das estratégias industriais.

Por outro lado, a pesquisa também ressalta as dificuldades enfrentadas por muitas indústrias brasileiras em relação à defasagem tecnológica. Este aspecto é corroborado por Arbix *et al.* (2017), que observam que a modernização do parque industrial é um desafio significativo à plena adoção das práticas de Manufatura Inteligente. As descobertas indicam que, enquanto países desenvolvidos, como Alemanha e Estados Unidos, implementam políticas e investimentos que promovem a integração de tecnologias inteligentes, o Brasil enfrenta barreiras estruturais que limitam seu avanço. Comparando as experiências internacionais, fica evidente a necessidade de iniciativas que incentivem a atualização tecnológica nas indústrias brasileiras, destacando a urgência de investimentos em infraestrutura.

Por fim, a discussão se insere no referencial teórico existente ao reforçar a importância da Manufatura Inteligente como um componente essencial para a transformação industrial contemporânea. Os conceitos discutidos por Roblek *et al.* (2016) e Sangeetha *et al.* (2018) são reafirmados nas evidências coletadas, indicando que a transição da produção em massa para modelos mais flexíveis e personalizados é uma tendência crescente. Assim, a pesquisa não apenas aborda o problema de pesquisa, mas também abre novos caminhos para a indústria, enfatizando que a adoção de tecnologias emergentes é crucial para a eficiência e competitividade das operações de manufatura na era da Indústria 4.0. As descobertas apoiam a argumentação de que a digitalização e a automação não são apenas vantagens competitivas, e sim requisitos fundamentais para a sobrevivência e o sucesso da manufatura moderna.

3. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar os impactos da Manufatura Inteligente na eficiência e adaptabilidade dos processos de produção nas indústrias. Ao longo da pesquisa, foi possível constatar que a adoção de tecnologias emergentes, como Internet das Coi-

sas e sistemas ciberfísicos, apresenta um potencial significativo para otimizar operações e promover uma maior responsividade às demandas do mercado. Embora os resultados tenham mostrado um claro alinhamento com os objetivos propostos, também ficou evidente que muitos desafios ainda persistem, principalmente relacionados à infraestrutura e à capacitação de mão de obra.

A resposta ao problema de pesquisa, que buscou entender como a Manufatura Inteligente pode ser implementada de forma eficaz nas indústrias, revelou que, embora as tecnologias existam e as oportunidades sejam numerosas, a transição para essas práticas inovadoras demanda não apenas investimento em tecnologia, mas também uma mudança cultural dentro das organizações. Muitas empresas ainda se encontram em estágios iniciais de adoção, enfrentando barreiras que incluem resistência à mudança e falta de conhecimento sobre as novas tecnologias. Essa realidade limita a capacidade de muitas indústrias de colher os benefícios que a Manufatura Inteligente pode proporcionar.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se a amostra restrita de indústrias analisadas, que pode não refletir a diversidade do setor produtivo brasileiro como um todo. Além disso, a rápida evolução das tecnologias pode tornar algumas das conclusões rapidamente obsoletas, o que ressalta a importância de estudos contínuos nessa área. As recomendações incluem a necessidade de políticas públicas que incentivem a modernização e a capacitação nas indústrias, além de programas de formação que ajudem os colaboradores a se adaptarem a essa nova realidade.

Por fim, propõe-se que futuras pesquisas explorem modelos específicos de adoção da Manufatura Inteligente em diferentes setores e regiões do Brasil, bem como o impacto de iniciativas governamentais no processo de transformação industrial. Esta investigação pode proporcionar uma compreensão mais aprofundada das melhores práticas e estratégias que podem ser adotadas para facilitar a implementação bem-sucedida da Manufatura Inteligente, contribuindo assim para o fortalecimento da competitividade da indústria nacional.

REFERÊNCIAS

- ARBIX, Glauco. *et al.* O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos estudos CEBRAP**, v. 36, p. 29-49, 2017.
- CHAVES, Karla Ricardo. **A manufatura no contexto dos princípios da indústria 4.0: barreiras e impactos**. 2022. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2022.
- FEIRA INTERNACIONAL DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS (FEIMEC). **Manufatura Avançada: tudo que você precisa saber sobre a 4ª Revolução Industrial e os desafios a serem enfrentados para a sua implantação no Brasil**. (E-Book). 2016. 31 p.
- JIN, Mingzhou. *et al.* Impact of advanced manufacturing on sustainability: An overview of the special volume on advanced manufacturing for sustainability and low fossil carbon emissions. **Journal of cleaner production**, v. 161, p. 69-74, 2017.
- LU, Hsi-Peng; WENG, Chien-I. Smart manufacturing technology, market maturity analysis and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 133, p. 85-94, 2018.
- MAJEED, Arfan. *et al.* A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 67, p. 102026, 2021.
- NATH, Surajit; SARKAR, Bijan. Performance evaluation of advanced manufacturing technologies: A De novo approach. **Computers & industrial engineering**, v. 110, p. 364-378, 2017.
- ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A complex view of industry 4.0. **Sage open**, v. 6, n. 2, p.



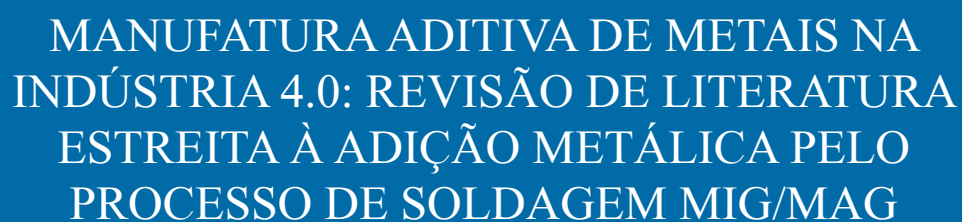
2158244016653987, 2016.

SANGEETHA, A. Lakshmi. *et al.* Particle swarm optimization tuned cascade control system in an Internet of Things (IoT) environment. **Measurement**, v. 117, p. 80-89, 2018.

TAALBI, Josef. Evolution and structure of technological systems-An innovation output network. **Research Policy**, v. 49, n. 8, p. 104010, 2020.

XIA, Tangbin. *et al.* Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 178, p. 255-268, 2018.

WANG, Baicun. *et al.* Smart manufacturing and intelligent manufacturing: A comparative review. **Engineering**, v. 7, n. 6, p. 738-757, 2021.



Gilmar dos Anjos Formigosa
Ronaldo de Jesus Barros

36

Resumo

Este trabalho aborda a transformação provocada pela Indústria 4.0 e a manufatura aditiva na produção industrial, com foco nas oportunidades e desafios apresentados por essas tecnologias emergentes. O objetivo geral é investigar como a integração de inovações como inteligência artificial e processos de manufatura aditiva pode impactar a eficiência e a personalização da produção. A pesquisa foi conduzida por meio de uma abordagem qualitativa, utilizando análise documental e revisão da literatura existente sobre o tema. Os principais resultados demonstraram que a adoção dessas tecnologias não apenas melhora a eficiência dos processos produtivos, mas também possibilita uma produção mais sustentável. Contudo, o estudo revelou barreiras significativas à implementação, como resistência cultural, custos elevados e escassez de dados experimentais. As considerações finais indicam que, apesar dos desafios, existe um potencial promissor para a intersecção entre inovação e sustentabilidade. Recomendações para futuras pesquisas incluem a necessidade de coletar dados mais robustos sobre a aplicação da manufatura aditiva e explorar estratégias eficazes para superar as limitações identificadas. Em suma, o trabalho contribui para a compreensão dos impactos da Indústria 4.0 e da manufatura aditiva na produção industrial, destacando a importância de um planejamento cuidadoso para sua adoção efetiva.

Palavras-chave: Impressão 3D, Manufatura Aditiva de Metais, Soldagem MIG/MAG, Indústria 4.0, Tecnologias de Fabricação.

Abstract

This work addresses the transformation brought about by Industry 4.0 and additive manufacturing in industrial production, focusing on the opportunities and challenges posed by these emerging technologies. The general objective is to investigate how the integration of innovations such as artificial intelligence and additive manufacturing processes can impact production efficiency and customization. The research was conducted using a qualitative approach, employing document analysis and a review of existing literature on the subject. The main findings demonstrated that adopting these technologies not only enhances production efficiency but also enables more sustainable manufacturing. However, the study revealed significant barriers to implementation, such as cultural resistance, high costs, and a lack of experimental data. The final considerations indicate that despite the challenges, there is promising potential at the intersection of innovation and sustainability. Recommendations for future research include the need to gather more robust data on the application of additive manufacturing and to explore effective strategies for overcoming the identified limitations. In summary, the work contributes to understanding the impacts of Industry 4.0 and additive manufacturing on industrial production, highlighting the importance of careful planning for their effective adoption.

Keywords: 3D Printing, Metal Additive Manufacturing, MIG/MAG Welding, Industry 4.0, Manufacturing Technologies.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 tem suas raízes na primeira revolução industrial, marcada pela mecanização das atividades industriais. Na segunda revolução industrial, a energia elétrica foi incorporada, abrindo caminho para o desenvolvimento de novos métodos de produção. A terceira revolução industrial, ocorrida no século XX, se caracterizou pela fusão da eletrônica e da tecnologia da informação.

O diferencial da Indústria 4.0 é a ênfase na comunicação entre máquinas, na automação dos processos e na redução da dependência da mão de obra direta na execução de atividades e produção de bens. A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é uma das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Nesse contexto, ela ocupa um papel crucial na fabricação de objetos tridimensionais, os construindo camada por camada a partir de modelos digitais.

A integração da robótica industrial na Indústria 4.0 é uma realidade, apesar disso, novas abordagens estão sendo exploradas para a utilização de robôs no contexto fabril. A adoção da manufatura aditiva de metais, por meio do emprego de robôs de soldagem na criação de produtos complexos, emerge como uma solução para as cadeias de suprimentos industriais. Esse enfoque é especialmente relevante para aquelas que enfrentam pressões de mercado para inovação ou dependem da entrega rápida de peças de reposição para restabelecer a operação de equipamentos no menor tempo possível.

Entre os materiais utilizados na manufatura aditiva, destacam-se os metais e os polímeros. No âmbito específico da adição metálica, o processo de soldagem MIG/MAG tem se destacado como uma técnica relevante. Essa abordagem permite a deposição controlada e precisa de material metálico, possibilitando a criação de peças personalizadas e complexas. A revisão de literatura estreita à adição metálica pelo processo de soldagem MIG/MAG buscou explorar avanços, desafios, oportunidades e impactos dessa tecnologia na indústria atual.

A manufatura aditiva de metais na Indústria 4.0 representa um avanço significativo no cenário industrial contemporâneo. Este processo inovador, que utiliza técnicas de fabricação aditiva para criar peças metálicas, tem transformado a maneira como as indústrias produzem e implementam componentes complexos. Dentro desse contexto, a utilização de tecnologias como a soldagem MIG/MAG adiciona um aspecto crucial à discussão, uma vez que essa abordagem tradicional de união de metais é integrada à dinâmica da manufatura aditiva.

Destaca-se, portanto, a importância de explorar essa convergência entre manufatura aditiva e processos de soldagem a arco elétrico, evidenciando a necessidade de compreender como essas tecnologias podem cooperar entre si em favorecimento da produção industrial.

Quanto à relevância da pesquisa no atual cenário, a conjunção da manufatura aditiva de metais com a soldagem MIG/MAG não apenas representa uma potencial revolução nos processos de produção, mas também levanta desafios e oportunidades inexplorados. Compreender a interação entre essas técnicas é vital para otimizar a eficiência, qualidade e custo dos produtos resultantes, além de contribuir para a sustentabilidade e competitividade da indústria. Assim, um intuito importante desta pesquisa proposta é fornecer perspectivas importantes para trabalhadores da indústria, pesquisadores e formuladores de políticas.



Quanto às maneiras pelas quais a pesquisa pode contribuir para a sociedade e o meio acadêmico, ao desvendar as nuances da manufatura aditiva de metais aliada à soldagem MIG/MAG, busca-se proporcionar avanços tangíveis na eficiência produtiva, redução de resíduos e aumento da flexibilidade no *design* e fabricação de peças metálicas. Além disso, ao oferecer conhecimentos nesse campo emergente, a pesquisa contribui para a formação de profissionais qualificados e impulsiona a inovação na indústria. Dessa forma, a relevância da pesquisa transcende os limites acadêmicos, promovendo impactos positivos na sociedade e no desenvolvimento tecnológico.

É notório que a manufatura aditiva está se consolidando como uma presença significativa no cenário industrial devido à sua capacidade de simplificar a fabricação de componentes específicos e contribuir para o desenvolvimento de novos produtos e abordagens de fabricação. A predominância das operações de manufatura aditiva envolve o uso de polímeros como materiais de adição, entretanto, existe uma crescente demanda por produtos que incorporem metais como material adicional, e já existem diversos processos estabelecidos para a manufatura aditiva de metais. Diante desse contexto, questiona-se: como a implementação conjunta da Indústria 4.0, da manufatura aditiva de metais por processos a arco elétrico (em especial, por processo de soldagem MIG/MAG) impactam a eficiência operacional e a qualidade dos produtos na indústria contemporânea?

O objetivo principal deste trabalho foi compreender os impactos da implementação conjunta da Indústria 4.0 e da manufatura aditiva de metais por processos de soldagem a arco elétrico, como a soldagem MIG/MAG, na eficiência operacional e qualidade dos produtos na indústria contemporânea. Para alcançar esse propósito, foi realizada uma revisão bibliográfica que abordou a Indústria 4.0 e a manufatura aditiva de metais, com o intuito de explorar as pesquisas mais recentes, adquirir uma compreensão detalhada das tendências emergentes, avanços tecnológicos, implementações práticas e as repercussões dessas inovações nos ambientes industriais. Além disso, será uma revisão-se as características do processo de soldagem MIG/MAG associada à manufatura aditiva por soldagem a arco elétrico, identificando barreiras técnicas, econômicas e organizacionais que impactam sua implementação bem-sucedida. Também se avaliou como essa tecnologia pode impulsionar a inovação, reduzir custos, personalizar produtos e melhorar a eficiência dos processos industriais.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para esta pesquisa consistiu em uma Revisão Bibliográfica, configurando-se como um estudo qualitativo e descritivo. Vale ressaltar que este método não possui caráter exploratório, quantitativo, experimental, estudo de caso, não utiliza hipóteses e não permite a proposição de intervenções. A pesquisa bibliográfica foi conduzida com o objetivo de examinar e analisar criticamente a literatura existente sobre a Manufatura Aditiva de Metais, com foco na integração do processo de soldagem MIG/MAG. Foi considerado um período de análise dos últimos dez anos (2014-2024), abrangendo trabalhos publicados nesse intervalo temporal para assegurar a busca de resultados atuais e em fontes de consulta de maior relevância para o tema da pesquisa proposta.

Para realizar a busca bibliográfica de maneira abrangente, empregou-se um amplo leque de fontes, que engloba bases de dados acadêmicas, bibliotecas *online*, publicações especializadas e revistas científicas. As bases de dados selecionadas para este estudo incluíram a SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), o Google Acadêmico e o Portal de

Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), juntamente com repositórios institucionais presentes em ambientes universitários. Na busca por referências, foram empregados descritores específicos relacionados ao tema em questão como “Impressão 3D”, “Manufatura Aditiva de Metais”, “Soldagem MIG/MAG”, “Indústria 4.0” e “Tecnologias de Fabricação”. A escolha criteriosa desses descritores visou garantir a abrangência e precisão na identificação de estudos pertinentes ao escopo da pesquisa.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Indústria 4.0

Atualmente, o termo “Quarta Revolução Industrial” é frequentemente mencionado, pois muitos especialistas acreditam que estamos em uma fase de transição, superando a Terceira Revolução Industrial e entrando em um novo ciclo de desenvolvimento tecnológico. De acordo com alguns autores, o setor industrial já está vivenciando esta quarta revolução, em vez de uma simples continuidade da terceira. A rapidez e a abrangência dos avanços tecnológicos romperam a linearidade das revoluções anteriores, provocando mudanças significativas nos sistemas produtivos (Schwab, 2016).

Macedo (2016) esclarece que a indústria está enfrentando a quarta revolução, que envolve tecnologias como inteligência artificial, robótica, impressão 3D, internet das coisas e, especialmente, nanotecnologia. A Quarta Revolução Industrial comumente é associada a aumentos de produtividade com custos mais baixos e uma maior integração entre os mundos físico e virtual. O conceito de indústria foi proposto recentemente e engloba as principais inovações tecnológicas nos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. A Indústria 4.0 promete transformar a organização dos sistemas de produção, onde todos os equipamentos envolvidos estarão interconectados, trocando informações que permitirão ajustes em sua programação conforme os eventos que ocorrem tanto dentro quanto fora do ambiente industrial (Silva Junior, 2022).

2.2.2 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, está se tornando cada vez mais popular nas indústrias. Isso porque, ao contrário dos métodos tradicionais que removem material para criar peças, a impressão 3D adiciona camadas de matéria-prima. Essa técnica é ideal para diversos setores, especialmente para a criação de protótipos e a produção de pequenos lotes (Alberti; Silva; D’oliveira, 2014; Rigotti, 2020).

Essa tecnologia traz vantagens significativas. Nos métodos tradicionais de fabricação, a cadeia de suprimentos pode levar meses e exige um investimento alto, só viável para grandes volumes de produção. Com a impressão 3D, muitas dessas etapas são eliminadas, os custos de configuração são mínimos, e a produção de apenas alguns itens se torna economicamente viável. Isso facilita a personalização de produtos, como próteses e implantes, oferecendo melhores resultados para os pacientes. Por exemplo, quase todos os aparelhos auditivos personalizados são agora fabricados com impressão 3D (Silva Junior, 2020).

De acordo com a norma ISO-ASTM 52900, da *International Organization for Standardization – ISO/ American Society of The International Association for Testing and Materials – ASTM* (2015), a Manufatura Aditiva (AM) é um conjunto de processos que utiliza a



adição de material camada por camada para criar componentes a partir de um modelo tridimensional. Isso contrasta com os métodos tradicionais, como a usinagem e a fundição, que removem material ou moldam peças a partir de formas pré-existentes.

2.2.3 Manufatura Aditiva de Metais: Ênfase à Soldagem MIG/MAG

Atualmente, existem pelo menos dez processos diferentes de impressão 3D em metal. A primeira tecnologia desenvolvida para esse fim foi a fusão em leito de pó a laser. Muitos desses métodos têm suas raízes em técnicas tradicionais, como a soldagem a arco. No entanto, alguns processos são relativamente novos e ainda não há muitas informações sobre como manipular e ajustar suas variáveis, o que pode dificultar seu uso (Ampower, 2019).

Segundo a norma ISO-ASTM 52900 (2015), o processo de Deposição Direta de Energia (DED) utiliza uma fonte concentrada de energia térmica para fundir o material durante a deposição. Os sistemas DED podem usar diferentes fontes de energia, como feixes de laser, feixes de elétrons ou arcos elétricos, e geralmente empregam pó ou arame como matéria-prima. A deposição é realizada em ambientes de gás inerte ou vácuo (Astm, 2016).

A manufatura aditiva com o processo DED pode ser aplicada a uma variedade de materiais, incluindo cerâmica, metais e polímeros. Os sistemas DED têm algumas características importantes: são capazes de lidar com componentes de grande volume (mais de 1000 mm³), possuem altas taxas de deposição, alimentam a matéria-prima diretamente no banho fundido, podem depositar material diretamente em componentes já existentes e permitem alterar a composição química ao longo do processo, o que é útil para criar componentes com gradientes funcionais (Astm, 2016).

A Manufatura Aditiva por Fio e Arco (WAAM) é um processo utilizado tanto para a impressão 3D quanto para o reparo de peças metálicas, e faz parte do grupo de processos DED. O WAAM combina dois métodos de produção: a soldagem a arco com gás (GMAW) e a manufatura aditiva. Esse processo funciona realizando múltiplas camadas de soldagem até que a peça 3D final seja formada (Figura 1). A produção de peças com WAAM é realizada por um robô de soldagem integrado a uma fonte de energia, onde uma tocha de soldagem derrete a matéria-prima de arame para construir as peças tridimensionais (Silva Junior, 2022).



Figura 1. Fabricação de uma hélice por adição de metal em camadas através da soldagem

Fonte: Silva Junior (2022, p. 24)

O processo de soldagem a arco com gás de proteção, conhecido como GMAW (Gas

Metal Arc Welding), é também chamado de soldagem MIG/MAG. No caso da soldagem MIG (*Inert Metal Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*), um arco elétrico é criado entre um fio consumível e as peças a serem soldadas. O arco derrete o fio continuamente enquanto ele alimenta a poça de fusão. Durante a soldagem, o metal é protegido da atmosfera por um fluxo de gás ou mistura de gases, que pode ser inerte, como argônio e hélio, ou reativo, como dióxido de carbono puro ou misturas de gases inertes e reativos. Esses gases ajudam a evitar a contaminação do fio, estabilizar o arco e controlar a transferência de metal (Groover, 2016; Martins, 2018).

Em comparação com métodos tradicionais de fabricação, como fundição e forjamento, o WAAM (Manufatura Aditiva por Fio e Arco) e outras técnicas de fabricação aditiva são relativamente novos. O WAAM se destaca de várias maneiras em relação aos métodos tradicionais e outras técnicas de Deposição Direta de Energia (DED). A diferença mais marcante entre a manufatura aditiva e a tradicional é a descentralização do processo. Um design bem pensado para o WAAM pode permitir uma otimização topológica, e a seleção cuidadosa do arame usado como matéria-prima pode levar a uma otimização adicional do material, permitindo a criação de componentes com múltiplos materiais (Silva Junior, 2022).

2.2.4 Discussão

A Indústria 4.0 e a manufatura aditiva emergem como grandes pilares da transformação tecnológica na produção industrial contemporânea. A discussão desses temas revela como a integração de tecnologias avançadas, como a inteligência artificial, internet das coisas e manufatura aditiva, têm o potencial de remodelar processos produtivos inteiros. Schwab (2016) e Silva Junior (2022) destacam que essa revolução tecnológica se distingue por sua rapidez e abrangência, transformando não apenas as cadeias de produção, mas também a organização dos sistemas de manufatura. Essa tendência sugere um afastamento dos métodos tradicionais, focados em economias de escala e em processos lineares, para abordagens mais flexíveis e interconectadas.

No campo da manufatura aditiva, particularmente na manufatura aditiva de metais, há um progresso significativo em termos de eficiência e personalização de produtos, como próteses e peças industriais. Alberti, Silva e D'Oliveira (2014) e Rigotti (2020) destacam que a manufatura aditiva, em comparação aos métodos convencionais de fabricação, reduz a cadeia de suprimentos, os custos e o tempo de produção. Esse salto tecnológico, ao utilizar camadas de matéria-prima em vez de remover material, é especialmente relevante para a criação de protótipos e pequenas séries, o que representa uma vantagem competitiva significativa. A personalização em massa, como a criação de aparelhos auditivos personalizados mencionados por Silva Junior (2020), é um exemplo claro da flexibilidade oferecida por essa tecnologia.

Quando a manufatura aditiva de metais é realizada por processos de soldagem, como a soldagem MIG/MAG, observam-se resultados particularmente promissores. A combinação desses métodos, como evidenciado pelo processo WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), une a tradicional soldagem a arco com a impressão 3D, potencializando tanto a criação quanto o reparo de peças metálicas. Silva Junior (2022) sugere que esse processo se destaca por sua capacidade de produzir componentes de grandes volumes, mantendo a possibilidade de alterar a composição química durante a produção. No entanto, a literatura ainda carece de dados suficientes sobre a manipulação e ajuste de variáveis nesses processos relativamente novos, o que pode ser uma barreira para sua aplicação

generalizada (Ampower, 2019).

Entretanto, é importante discutir as limitações e desafios enfrentados por essas tecnologias. A manufatura aditiva de metais por processos como WAAM apresenta barreiras técnicas e econômicas que limitam sua implementação em larga escala. A escassez de informações sobre variáveis e o custo inicial de equipamentos avançados podem restringir sua adoção, especialmente em indústrias que não têm uma cultura de alta inovação tecnológica. Além disso, as exigências de ambientes controlados para a deposição de materiais em processos DED (Deposição Direta de Energia) podem inviabilizar o uso em determinados contextos industriais (Astm, 2016).

Uma implicação relevante dessas descobertas é a relação entre inovação e sustentabilidade. A Indústria 4.0, ao interconectar equipamentos e possibilitar ajustes em tempo real, oferece uma abordagem mais eficiente no uso de recursos, o que pode contribuir para processos produtivos mais sustentáveis (Macedo, 2016). No entanto, a implementação dessas tecnologias em ambientes industriais tradicionais ainda encontra desafios culturais e organizacionais. A resistência à mudança e os custos de transição são questões que podem atrasar a plena adoção dessas tecnologias, o que limita o alcance de seus potenciais benefícios (Schwab, 2016; Silva Junior, 2022).

Por fim, deve-se considerar a validade dos resultados apresentados. Embora as descobertas apontem para um futuro promissor, as limitações mencionadas — como a escassez de dados experimentais e a falta de padronização em algumas técnicas de manufatura aditiva — podem impactar a confiabilidade das previsões feitas (Rigotti, 2020). Pesquisas futuras devem focar em experimentos que avaliem essas variáveis de maneira mais sistemática, garantindo que a implementação prática dessas tecnologias possa ser realizada com maior segurança e eficiência (Ampower, 2019).

Em síntese, a Indústria 4.0 e a manufatura aditiva de metais, especialmente por meio de processos como a soldagem MIG/MAG, apresentam um enorme potencial para transformar a produção industrial. No entanto, sua adoção em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e organizacionais que precisam ser superados. A intersecção entre inovação tecnológica e sustentabilidade é um aspecto promissor, mas que requer uma implementação cuidadosa e progressiva, suportada por mais pesquisas e investimentos (Macedo, 2016; Silva Junior, 2022).

3. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar o impacto da Indústria 4.0 e da manufatura aditiva na produção industrial, com ênfase nas oportunidades e desafios que essas tecnologias emergentes oferecem. A análise realizada ao longo do estudo revelou que, de fato, a integração de tecnologias como inteligência artificial e manufatura aditiva tem o potencial de transformar significativamente os processos produtivos, permitindo uma produção mais eficiente e personalizada. Assim, os objetivos propostos foram alcançados, demonstrando que a adoção dessas inovações pode trazer benefícios substanciais para as empresas que buscam se adaptar às demandas contemporâneas do mercado.

Entretanto, a pesquisa encontrou barreiras técnicas e culturais que ainda dificultam a plena implementação dessas tecnologias em ambientes industriais tradicionais. A resistência à mudança e os custos de transição foram destacados como fatores que podem atrasar a adoção de práticas inovadoras. Além disso, a escassez de dados experimentais sobre a aplicação da manufatura aditiva em larga escala foi uma questão relevante, que

pode impactar a confiabilidade das previsões sobre o futuro dessa tecnologia.

Como resposta ao problema de pesquisa, conclui-se que a intersecção entre inovação tecnológica e sustentabilidade é um aspecto promissor, que requer uma implementação cuidadosa e progressiva. As descobertas sugerem que, apesar das dificuldades enfrentadas, há um caminho claro em direção a uma produção mais sustentável e eficiente. Para avançar nesse sentido, recomenda-se que futuras pesquisas sejam direcionadas para a coleta de dados mais robustos e sistemáticos, que ajudem a entender melhor as variáveis envolvidas na adoção da manufatura aditiva e na Indústria 4.0.

Além disso, é essencial que estudos futuros explorem como diferentes setores podem superar as barreiras identificadas e se beneficiar das inovações tecnológicas. A investigação sobre as melhores práticas de implementação em empresas que já utilizam essas tecnologias pode fornecer insights valiosos e orientações para outras organizações que ainda estão no início dessa jornada.

Em suma, o trabalho mostrou que a Indústria 4.0 e a manufatura aditiva têm um enorme potencial para transformar a produção industrial, mas a concretização desse potencial depende de um entendimento profundo dos desafios e limitações que cercam sua adoção. A reflexão sobre esses pontos é crucial para que as empresas possam trilhar um caminho efetivo em direção à inovação e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- ALBERTI, Eduardo André; SILVA, Leandro João da; D'OLIVEIRA, Ana Sofia. Manufatura Aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, p. 190-198, 2014.
- AMPOWER. **Metal Additive Manufacturing: Technology overview**. 2019. Disponível: https://ampower.eu/infographics/metal-additive-manufacturing/#av_section_2. Acesso em: 28 abr. 2024.
- AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM F3187-16: Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals**. West Conshohocken: ASTM International, 2016. 22 p.
- GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 737 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); AMERICAN SOCIETY OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ISO/ASTM 52900: 2015 (E): standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology**. Genève: ISO; West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- MACEDO, Daniel Almeida de. **A quarta revolução industrial**. 25 jan. 2016. Disponível em: <https://www.gazetadigital.com.br/editorias/opiniao/a-quarta-revolucao-industrial/467815>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- MARTINS, Anne Karyne Cunha. **Caracterização da interface da solda de amantecimento do aço SAE 8630M com Inconel 725 pelo processo de soldagem MIG**. 100 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- RIGOTTI, Genara. **Conheça as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 e algumas aplicações**. 06 out. 2020. Disponível em: <https://abii.com.br/com-abii-single-post-conheca-as-tecnologias-habilitadoras-da-industria-4-0-e-algumas-aplicacoes/>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- SCHWAB, Klaus. **Navigating the Fourth Industrial Revolution**. 20 jan. 2016. Disponível: <https://www.biznews.com/events/wef/2016/01/20/klaus-schwab-navigating-the-fourth-industrial-revolution>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- SILVA JUNIOR. Dominique Belicio Rodrigues da. **Análise das propriedades mecânicas de peças impressas por soldagem usando manufatura aditiva**. 2022. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Panambi, 2022.





USINAGEM CRIOGÊNICA: ÊNFASE ÀS VANTAGENS E DESVANTAGENS FRENTE À USINAGEM COM FLUIDO DE CORTE CONVENCIONAL

CRYOGENIC MACHINING: EMPHASIS ON ADVANTAGES AND
DISADVANTAGES COMPARED TO CONVENTIONAL CUTTING FLUID
MACHINING

Hudson Berg Gomes Ribeiro
Ronaldo de Jesus Barros

37

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão sobre a usinagem criogênica, destacando suas vantagens e limitações em relação à usinagem convencional no contexto de eficiência e sustentabilidade industrial. O estudo visa compreender como a substituição dos fluidos de corte convencionais por refrigerantes criogênicos, como o nitrogênio líquido, influencia a durabilidade das ferramentas e a qualidade superficial das peças usinadas. A metodologia aplicada baseou-se em uma análise descritiva da literatura especializada, considerando os benefícios documentados da usinagem criogênica, como a redução do desgaste das ferramentas e a eficácia no controle de temperatura durante o processo, assim como suas desvantagens, incluindo os altos custos de implementação e a complexidade logística. Os resultados demonstram que a usinagem criogênica oferece melhorias significativas em processos de alta exigência, mas enfrenta desafios econômicos que limitam sua adoção ampla, especialmente em pequenas e médias empresas. Conclui-se que, apesar das barreiras, a usinagem criogênica se mostra uma técnica promissora, particularmente em indústrias que trabalham com materiais de difícil usinagem. Recomenda-se que futuras pesquisas investiguem alternativas de refrigeração criogênica com foco em redução de custos e acessibilidade, contribuindo para ampliar a aplicação dessa tecnologia em setores industriais que buscam processos mais eficientes e ecologicamente responsáveis.

Palavras-chave: Usinagem Criogênica, Fluido De Corte, Vantagens, Desvantagens, Fabricação de Componentes Mecânicos.

Abstract

This article presents a review of cryogenic machining, highlighting its advantages and limitations compared to conventional machining in the context of industrial efficiency and sustainability. The study aims to understand how replacing conventional cutting fluids with cryogenic coolants, such as liquid nitrogen, influences tool durability and the surface quality of machined parts. The methodology applied was based on a descriptive analysis of specialized literature, considering the documented benefits of cryogenic machining, such as reduced tool wear and effective temperature control during the process, as well as its disadvantages, including high implementation costs and logistical complexity. The results demonstrate that cryogenic machining offers significant improvements in high-demand processes but faces economic challenges that limit its widespread adoption, especially in small and medium-sized enterprises. It is concluded that, despite the barriers, cryogenic machining proves to be a promising technique, particularly in industries working with difficult-to-machine materials. Future research is recommended to investigate cryogenic cooling alternatives focusing on cost reduction and accessibility, contributing to the broader application of this technology in industrial sectors seeking more efficient and environmentally responsible processes.

Keywords: Cryogenic Machining, Cutting Fluid, Advantages, Disadvantages, Manufacturing of Mechanical Components.



1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo fundamental na indústria moderna, essencial para a fabricação de uma ampla variedade de componentes mecânicos. Ao longo dos anos, diversos métodos e técnicas foram desenvolvidos para otimizar a eficiência e a qualidade deste processo. Nesse contexto, a usinagem criogênica emerge como uma abordagem inovadora, que utiliza temperaturas extremamente baixas para melhorar o desempenho e a precisão das operações de corte. Este método, que envolve a aplicação de fluidos criogênicos, como o nitrogênio líquido, tem despertado crescente interesse devido aos seus potenciais benefícios em termos de redução do desgaste da ferramenta, controle térmico da peça e melhoria da qualidade superficial. Por outro lado, a usinagem convencional com fluido de corte permanece amplamente empregada na indústria, sendo considerada uma técnica estabelecida e confiável. Utilizando fluidos lubrificantes e refrigerantes em temperatura ambiente, essa abordagem oferece vantagens como baixo custo operacional e facilidade de implementação. No entanto, apresenta desafios relacionados ao aumento da temperatura da peça e à disposição adequada dos fluidos de corte, levantando questões ambientais e de saúde ocupacional.

Diante desse cenário, surge a necessidade de uma análise comparativa entre a usinagem criogênica e a usinagem com fluido de corte convencional, visando identificar as vantagens e desvantagens de cada método. Este projeto estudo se propôs a explorar essa temática, examinando criticamente a literatura existente e fornecendo uma avaliação equilibrada das duas abordagens. Através de uma revisão bibliográfica abrangente, buscou-se elucidar as principais diferenças, benefícios e limitações de cada técnica, contribuindo para um melhor entendimento das opções disponíveis na fabricação de componentes mecânicos.

A usinagem é um componente crítico na cadeia de produção de uma ampla gama de produtos industriais, e a escolha da técnica adequada pode influenciar significativamente a qualidade, custo e eficiência do processo de fabricação. Nesse contexto, a investigação das vantagens e desvantagens da usinagem criogênica em comparação com a usinagem com fluido de corte convencional é de suma importância. A compreensão desses métodos permitirá que os profissionais e gestores da indústria tomem decisões mais informadas na seleção e aplicação das técnicas de usinagem mais apropriadas para diferentes contextos de produção.

Além disso, a pesquisa sobre esse tema é relevante devido ao potencial de impacto nas áreas técnica, econômica e ambiental. Ao avaliar as implicações das vantagens e desvantagens de cada técnica, é possível identificar oportunidades para melhorar a eficiência e a sustentabilidade dos processos de fabricação. Isso pode levar a ganhos de produtividade e redução de custos operacionais. Este estudo pode contribuir para o avanço do conhecimento científico e tecnológico na área de manufatura, fornecendo dados técnicos e científicos englobados no interesse de pesquisadores, educadores e profissionais do setor. A disseminação dos resultados obtidos pode estimular o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias de usinagem, bem como promover a colaboração entre diferentes campos disciplinares relacionados à engenharia mecânica, materiais e sustentabilidade industrial. Em última análise, este estudo contribui para o aprimoramento contínuo dos processos de fabricação e para a promoção de uma indústria mais eficiente.

A usinagem é uma atividade crucial na fabricação de componentes mecânicos em uma variedade de indústrias. A eficiência e a precisão desses processos têm um impacto

direto na qualidade e na competitividade dos produtos. Nos últimos anos, a usinagem criogênica emergiu como uma alternativa inovadora à usinagem com fluido de corte convencional, oferecendo potenciais benefícios, como a redução do desgaste da ferramenta e a melhoria da qualidade superficial. No entanto, a usinagem com fluido de corte convencional e a usinagem criogênica apresentam vantagens e desvantagens distintas que influenciam sua seleção e aplicação na indústria. Desse contexto surgiu o problema norteador ao qual este estudo buscou investigar: como as vantagens e desvantagens da usinagem criogênica em relação à usinagem com fluido de corte convencional influenciam a seleção e aplicação de cada técnica na indústria de fabricação de componentes mecânicos?

O estudo teve como objetivo analisar de forma abrangente e comparativa as vantagens e desvantagens da usinagem criogênica em relação à usinagem com fluido de corte convencional, buscando compreender como esses aspectos influenciam a seleção e aplicação de cada técnica na indústria de fabricação de componentes mecânicos. Para isso, foram descritas as principais vantagens da usinagem criogênica em comparação com a usinagem convencional, por meio de uma revisão detalhada da literatura técnica e científica sobre o tema. Além disso, foi realizada uma análise das desvantagens associadas a ambas as técnicas, considerando aspectos como custos operacionais e a complexidade do processo, com o intuito de entender os desafios enfrentados em cada uma delas. Por fim, buscou-se compreender como as vantagens e desvantagens influenciam as decisões de seleção e aplicação da usinagem criogênica e da usinagem com fluido de corte convencional na indústria de fabricação de componentes mecânicos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para este estudo foi uma Revisão de Literatura, que consistiu na análise crítica e sistemática de fontes bibliográficas relevantes sobre o tema em questão. Esta abordagem permitiu uma síntese abrangente do conhecimento existente, fornecendo uma base sólida para a compreensão e análise do problema de pesquisa proposto. Os materiais utilizados para a revisão foram livros, artigos científicos e teses/dissertações acadêmicas selecionados a partir de buscas em bases de dados especializadas, tais como Scopus, *Web of Science*, IEEE Xplore, Scielo e Google Acadêmico entre outras. Além disso, consultou-se periódicos científicos relevantes da área de engenharia mecânica e processos de fabricação. O período dos artigos pesquisados abrangeu os trabalhos publicados nos últimos dez anos. Esta escolha temporal permitiu uma análise atualizada do estado da arte da usinagem criogênica em comparação com a usinagem com fluido de corte convencional. As palavras-chave utilizadas na busca incluíram termos relacionados ao tema principal da pesquisa, tais como “usinagem criogênica”, “usinagem com fluido de corte”, “vantagens”, “desvantagens”, “fabricação de componentes mecânicos”, entre outros. A combinação estratégica desses descritores garantiu a abrangência e a especificidade das fontes selecionadas para a revisão bibliográfica.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Vantagens da Usinagem Criogênica

Os avanços na redução de temperatura começaram no século XIX, quando os princípios da termodinâmica estavam sendo desenvolvidos e as primeiras pesquisas em crioge-



nia foram realizadas entre 1850 e 1900. No começo, poucos cientistas se interessaram por essas descobertas, pois era difícil atingir as temperaturas muito baixas necessárias para liquefazer gases como oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e hélio. Foi só na primeira metade do século XX que a tecnologia de liquefação desses gases começou a ser mais amplamente utilizada (Stefánsson, 2014).

Por volta de 1880, Frederick Winslow Taylor teve a ideia de usar fluidos de corte para reduzir o calor durante a usinagem, o que melhorou a produtividade, aumentou a durabilidade das ferramentas e a qualidade das peças. No entanto, no século XX, surgiram preocupações ambientais, riscos à saúde dos operadores e altos custos relacionados ao tratamento e descarte desses fluidos, o que fez com que se procurassem outras técnicas de corte (Secco, 2017; Zindani; Kumar, 2020).

Embora seja importante reduzir ou evitar o uso de lubrificantes refrigerantes na usinagem, os materiais de corte geralmente não são suficientemente resistentes para trabalhar sem resfriamento, especialmente em operações complexas como perfuração. O resfriamento criogênico, que usa gases liquefeitos extremamente frios, aparece como uma alternativa promissora. Porém, a contração térmica é um grande desafio nessa técnica, podendo causar problemas como a aderência da ferramenta ao material usinado e mudanças nas dimensões das peças (Leadbeal **Júnior, 2017**; Dix *et al.*, 2014).

Na usinagem criogênica, substituem-se os fluidos de corte tradicionais por fluidos criogênicos, como nitrogênio líquido ou dióxido de carbono líquido. O nitrogênio líquido é geralmente preferido por ser mais fácil de manusear e ter menor impacto ambiental comparado ao dióxido de carbono. Esses fluidos podem ser aplicados de várias maneiras: pré-resfriamento, aplicação direta nas zonas de corte ou aplicação indireta na parte de trás da ferramenta de corte (Secco, 2017; Dix *et al.*, 2014).

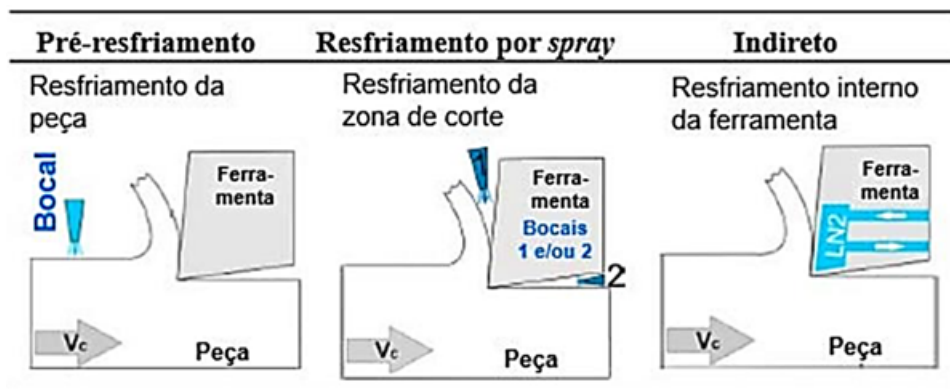


Figura 1. Formas de emprego do fluido criogênico

Fonte: Sena (2023, p. 7)

O uso do resfriamento criogênico na usinagem está se tornando cada vez mais comum graças aos resultados positivos das pesquisas, especialmente para materiais difíceis de trabalhar. Estudos mostram que essa técnica prolonga a vida útil das ferramentas de corte, melhora o controle dos cavacos e proporciona um acabamento de alta qualidade nas peças. Além disso, é considerada uma alternativa mais ecológica em comparação ao dióxido de carbono. Esses benefícios são ainda mais evidentes em altas velocidades de corte, onde os fluidos convencionais não conseguem manter a taxa de desgaste das ferramentas em níveis aceitáveis (Sena, 2023).

De acordo com Secco (2017), o resfriamento criogênico se popularizou no torneamento por ser acessível e por proporcionar uma estabilidade maior nas variáveis do processo. Contudo, no fresamento, a situação é mais complicada devido ao corte interrompido, que

causa ciclos térmicos e mecânicos na ferramenta, reduzindo sua vida útil e a qualidade das peças. O uso de fluidos criogênicos no fresamento, especialmente em materiais difíceis de usinar, é um tema de grande interesse porque seu poder de resfriamento pode diminuir significativamente a temperatura de corte e minimizar os efeitos negativos das variações térmicas, que aceleram o desgaste da ferramenta e prejudicam a qualidade da superfície das peças.

A usinagem criogênica traz uma vantagem dupla ao unir os benefícios da usinagem a seco com a capacidade de resfriamento rápido. Os fluidos mais usados são o CO₂ e o LN₂, cada um com suas próprias necessidades de armazenamento e pressão de trabalho, e com diferentes formas de gerar baixas temperaturas. Com os avanços tecnológicos, várias estratégias foram desenvolvidas para melhorar a lubrificação e refrigeração na zona de corte. Os principais fatores analisados na usinagem criogênica incluem a taxa de desgaste das ferramentas, a força necessária para a usinagem, a formação dos cavacos, a microestrutura das peças usinadas e a relação custo-benefício (Zindani; Kumar, 2020).

Comparando o uso de fluidos de corte tradicionais com a usinagem criogênica, vemos várias vantagens. O desgaste da ferramenta é significativamente menor com o resfriamento criogênico, o que prolonga sua vida útil. Além disso, o tempo de usinagem pode ser reduzido, já que o resfriamento criogênico permite taxas de corte mais altas, aumentando a eficiência do processo. Em termos de qualidade superficial, a usinagem criogênica tende a produzir acabamentos melhores, com menos falhas como trincas ou deformações. Esses benefícios não só aumentam a produtividade, mas também melhoram a qualidade geral do processo de usinagem (Sena, 2023).

2.2.2 Desvantagens da Usinagem Criogênica

O uso de fluidos criogênicos, como o nitrogênio líquido, pode impactar os custos operacionais de maneira significativa, em especial quando comparado à usinagem convencional, porque o processo criogênico exige equipamentos altamente especializados, que possuem custos de aquisição e manutenção substancialmente maiores. Além disso, o fornecimento constante de nitrogênio líquido ou outros gases criogênicos demanda uma infraestrutura logística dedicada, o que inclui tanques de armazenamento pressurizados, sistemas de distribuição controlados e medidas rigorosas de segurança para lidar com materiais em temperaturas extremamente baixas. Esses fatores somam-se ao fato de que, em operações de menor escala ou em processos que não demandam alta velocidade de corte ou precisão extrema, a relação custo-benefício da usinagem criogênica torna-se desvantajosa. A usinagem convencional, que utiliza sistemas de refrigeração mais simples e amplamente disponíveis, como o fluido de corte à base de óleo ou água, acaba sendo uma escolha mais econômica. Isso é especialmente relevante para pequenas e médias empresas, onde a capacidade de investimento em tecnologia criogênica e o retorno financeiro esperado podem não justificar a adoção de um sistema tão complexo. Além disso, o custo recorrente do fornecimento de nitrogênio líquido é um fator que pode se tornar um grande obstáculo à viabilidade econômica de longo prazo, visto que a reposição e o transporte desses gases adicionam um componente de custo variável que não existe com fluidos de corte convencionais (Zidani; Kumar, 2020; Arzoo; Hassan; Gupta, 2022).

A usinagem criogênica, embora traga benefícios significativos em termos de aumento da vida útil das ferramentas para materiais resistentes como aços inoxidáveis, enfrenta dificuldades ao lidar com materiais mais delicados, como polímeros. Isso ocorre porque esses materiais podem sofrer deformações ao serem expostos a temperaturas extremamen-



te baixas, prejudicando o acabamento superficial e a integridade da peça. Outro ponto crítico é a dificuldade de garantir uma refrigeração uniforme em toda a extensão da ferramenta. As variações de temperatura podem causar um desgaste desigual, comprometendo a eficiência da ferramenta ao longo do processo de usinagem. Esse tipo de desgaste irregular reduz o controle sobre a qualidade final do produto, além de aumentar o tempo de inatividade para trocas frequentes de ferramentas ou ajustes no processo (Zidani; Kumar, 2020; Khanna, 2021).

Embora a usinagem criogênica seja considerada mais ecológica do que a usinagem convencional, por não utilizar fluidos de corte à base de óleo que geram resíduos, ela também apresenta desafios ambientais. O manuseio inadequado de gases criogênicos, como o nitrogênio líquido ou o dióxido de carbono, pode resultar em riscos à saúde dos operadores e impactos ambientais negativos. Se não houver uma gestão eficiente do descarte e dos procedimentos de segurança, esses gases podem contribuir para acidentes industriais e danos ao meio ambiente. Portanto, apesar de ser uma alternativa mais limpa em termos de resíduos de fluidos, a usinagem criogênica exige cuidados rigorosos com o manuseio dos materiais para evitar qualquer consequência adversa, tanto para os trabalhadores quanto para o ecossistema (Zidani; Kumar, 2020; Khanna, 2021).

2.2.3 Influências das Vantagens e Desvantagens

O uso de novos materiais tem sido uma constante em nossa era de desenvolvimento acelerado, proporcionando maior flexibilidade em termos de peso, custo e ergonomia. No setor de manufatura, processos de usinagem, como fresagem, torneamento e furação, são fundamentais para alcançar o acabamento preciso das peças, especialmente quando se busca alta precisão dimensional. Nesses processos, fatores como o fluido de corte, o design da ferramenta e os parâmetros de corte têm impacto direto na eficiência e sustentabilidade da operação (Pusavec; Krajnik; Kopac, 2010; Pusavec et al., 2015).

Com regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, a crescente exigência por precisão e a conscientização dos consumidores sobre a responsabilidade ambiental, a indústria está continuamente em busca de soluções inovadoras e ecologicamente corretas. O foco da manufatura moderna é maximizar a eficiência dos processos produtivos, ao mesmo tempo em que se minimiza o consumo de energia, de modo a enfrentar as pressões da competitividade global e atender às exigências ambientais e de sustentabilidade que regem o mercado atual (Pusavec; Krajnik; Kopac, 2010; Pusavec et al., 2015).

Para otimizar a produção em processos de usinagem, a escolha e aplicação de fluidos de corte se destacam como um dos elementos mais essenciais. Esses fluidos desempenham funções cruciais, como a lubrificação das superfícies de contato entre cavaco, ferramenta e peça, além de promover a dissipação do calor gerado durante o processo. Tradicionalmente, os refrigerantes e lubrificantes à base de água e óleo têm sido amplamente utilizados. Contudo, as indústrias estão cada vez mais pressionadas a reduzir o uso de fluidos refrigerantes nocivos, em virtude de diversas questões tecnológicas e ambientais (Boswell et al., 2017; Bhat; Agrawal; Khanna, 2020).

Uma alternativa promissora para enfrentar esse desafio é a utilização do MQL (*Minimum Quantity Lubrication*), que não só oferece uma lubrificação eficaz, mas também pode levemente aumentar a velocidade de corte e a durabilidade das ferramentas. No entanto, vale ressaltar que essa abordagem não é tão eficiente na absorção de grandes quantidades de calor geradas na zona de corte. Portanto, um dos grandes desafios a ser superado na próxima geração de usinagem é substituir os métodos convencionais de res-

friamento por técnicas de resfriamento a seco ou quase seco. Nesse contexto, a usinagem criogênica surge como uma tecnologia promissora, apresentando excelente eficiência em resfriamento e contribuindo para práticas mais sustentáveis (Boswell *et al.*, 2017; Bhat; Agrawal; Khanna, 2020).

2.2.4 Discussão

Os benefícios da usinagem criogênica, como a redução do desgaste das ferramentas e a melhoria da qualidade superficial das peças, estão bem documentados na literatura. A substituição dos fluidos de corte convencionais por refrigerantes criogênicos, como o nitrogênio líquido, não apenas minimiza o impacto ambiental, mas também proporciona um controle mais eficaz da temperatura durante o processo de usinagem. Estudos indicam que essa técnica pode aumentar significativamente a vida útil das ferramentas e melhorar o acabamento das superfícies, particularmente em operações de alta velocidade, onde os fluidos convencionais muitas vezes falham em manter a eficiência (Secco, 2017; Sena, 2023).

Esses resultados estão alinhados com os objetivos da pesquisa, que visaram analisar como essas vantagens influenciam a escolha de técnicas na fabricação de componentes mecânicos. A literatura sugere que a crescente demanda por processos mais sustentáveis e eficientes pode levar a uma maior adoção da usinagem criogênica, especialmente em indústrias que trabalham com materiais difíceis de usar, como os aços inoxidáveis (Zindani; Kumar, 2020). No entanto, a usinagem criogênica, apesar de suas promessas, requer um investimento inicial substancial e uma infraestrutura de suporte que pode ser desafiadora para empresas menores.

Por outro lado, as desvantagens associadas à usinagem criogênica não podem ser ignoradas. O alto custo dos equipamentos e a necessidade de uma logística complexa para o fornecimento de nitrogênio líquido representam barreiras significativas para a adoção generalizada dessa tecnologia. A literatura também aponta que, em certas operações de usinagem que envolvem materiais delicados, como polímeros, a exposição a temperaturas extremas pode levar a deformações e comprometimentos no acabamento superficial (Zindani; Kumar, 2020).

Essas questões levantam a necessidade de um exame crítico ao comparar a usinagem criogênica com os métodos tradicionais. Enquanto a usinagem convencional, com suas técnicas mais estabelecidas e custos operacionais inferiores, ainda é preferida em muitos casos, a relação custo-benefício da usinagem criogênica pode se tornar mais atrativa à medida que as tecnologias evoluem e os processos se tornam mais acessíveis (Arzoo; Hassan; Gupta, 2022). Portanto, a pesquisa buscou compreender como essas desvantagens influenciam a seleção entre as duas técnicas, um aspecto que se reflete nas decisões empresariais em ambientes de alta competitividade.

A escolha entre usinagem criogênica e convencional não é apenas uma questão de preferência técnica, mas envolve uma análise cuidadosa dos *trade-offs* em relação ao custo, eficiência e qualidade do produto final. A literatura destaca que, enquanto a usinagem criogênica pode ser vantajosa em aplicações específicas, a usinagem convencional ainda é amplamente utilizada devido ao seu custo operacional mais baixo e à familiaridade das indústrias com os métodos tradicionais (Pusavec *et al.*, 2015; Boswell *et al.*, 2017).

A escolha deve levar em consideração a natureza do material a ser usinado e os requisitos de produção, uma vez que cada técnica pode ter desempenhos variados depen-

dendo das circunstâncias de aplicação (Bhat; Agrawal; Khanna, 2020). Assim, a pesquisa destaca a necessidade de um entendimento contextualizado da usinagem na indústria moderna, refletindo as exigências crescentes por eficiência e sustentabilidade.

As limitações na análise das vantagens e desvantagens da usinagem criogênica incluem a variedade de aplicações e os diferentes materiais envolvidos, que podem afetar significativamente os resultados (Arzoo; Hassan; Gupta, 2022; Khanna, 2021). Além disso, a falta de dados longitudinais sobre o desempenho da usinagem criogênica em diferentes cenários industriais representa um desafio para a generalização das conclusões (Senna, 2023).

Portanto, a pesquisa sublinha a complexidade das decisões de seleção entre usinagem criogênica e convencional, sugerindo que um entendimento mais profundo das condições de aplicação pode fornecer diretrizes práticas valiosas para a indústria. A continuidade da investigação nas vantagens e desvantagens da usinagem é crucial, especialmente em um cenário onde novas tecnologias estão em constante evolução para atender às demandas de eficiência e sustentabilidade (Zidani; Kumar, 2020; Pusavec *et al.*, 2010).

3. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar os benefícios e limitações da usinagem criogênica em comparação com a usinagem convencional, especialmente no contexto industrial atual que busca maior eficiência e sustentabilidade. Os resultados discutidos ao longo do estudo indicam que os objetivos propostos foram amplamente alcançados, evidenciando que a usinagem criogênica oferece vantagens significativas em termos de redução do desgaste das ferramentas e melhora da qualidade superficial das peças, o que reforça sua viabilidade em operações de alta exigência. Ao substituir os fluidos de corte convencionais por refrigerantes criogênicos, torna-se possível controlar de forma mais eficaz a temperatura durante a usinagem, resultando em um processo mais sustentável e com menos impacto ambiental. Dessa forma, os objetivos iniciais de compreender os impactos dessa técnica foram atendidos, proporcionando uma visão detalhada das condições sob as quais a usinagem criogênica se destaca como escolha técnica vantajosa.

Em resposta ao problema de pesquisa, conclui-se que a usinagem criogênica é uma alternativa eficaz, embora com limitações práticas significativas. Se, por um lado, ela representa uma melhoria na durabilidade das ferramentas e na qualidade de acabamento, por outro, os elevados custos de implementação e a infraestrutura necessária para o armazenamento e fornecimento de nitrogênio líquido são barreiras que impedem sua adoção em larga escala, especialmente em empresas de menor porte. Além disso, a aplicação dessa técnica requer uma análise criteriosa do material a ser usinado, uma vez que alguns materiais, como polímeros, podem sofrer deformações quando expostos a temperaturas criogênicas. Essas considerações ressaltam a importância de uma avaliação cuidadosa entre custo e benefício para decidir pela implementação da usinagem criogênica em diferentes cenários industriais.

O estudo apresenta limitações em relação à generalização dos resultados, visto que a usinagem criogênica envolve uma grande variedade de materiais e condições de corte que podem influenciar os efeitos observados. Adicionalmente, a ausência de dados longitudinais sobre o desempenho dessa técnica ao longo do tempo representa uma limitação que deve ser abordada em futuras pesquisas. Recomenda-se que investigações futuras incluam estudos comparativos mais abrangentes, especialmente em indústrias onde o controle térmico e a durabilidade das ferramentas são críticos. Tais estudos podem for-

necer insights adicionais sobre a eficácia da usinagem criogênica em condições variadas, ampliando a compreensão sobre sua aplicabilidade e viabilidade econômica.

Portanto, embora a usinagem criogênica demonstre um potencial considerável em aplicações específicas, sua adoção generalizada ainda depende de avanços tecnológicos e de uma redução nos custos operacionais associados. Trabalhos futuros poderiam explorar novas técnicas de refrigeração criogênica com foco em uma implementação mais acessível, o que contribuiria para ampliar a viabilidade dessa tecnologia em um mercado industrial que demanda processos produtivos cada vez mais eficientes e sustentáveis. A partir das análises realizadas, conclui-se que a usinagem criogênica representa uma tecnologia promissora, mas que ainda requer aprimoramentos para que possa se consolidar como uma alternativa viável para uma ampla gama de aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

- ARZOO, Md Zia; HASSAN, Mozammil; GUPTA, N. A Comparison Study between Conventional and Cryogenic Machining. In: **Innovations in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICIME 2021**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. p. 329-337.
- BHAT, Prathamesh; AGRAWAL, Chetan; KHANNA, Navneet. Development of a sustainability assessment algorithm and its validation using case studies on cryogenic machining. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 2, p. 42, 2020.
- BOSWELL, Brian. *et al.* A review identifying the effectiveness of minimum quantity lubrication (MQL) during conventional machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, p. 321-340, 2017.
- DIX, Martin *et al.* Modeling of drilling assisted by cryogenic cooling for higher efficiency. **CIRP Annals**, v. 63, n. 1, p. 73-76, 2014.
- KHANNA, Navneet *et al.* Review on design and development of cryogenic machining setups for heat resistant alloys and composites. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 68, p. 398-422, 2021.
- LEADEBAL JÚNIOR, Welber Vasconcelos. **Influência da refrigeração criogênica na vida da ferramenta de PCBN e na integridade superficial do aço ferramenta D6**. 2017. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- PUSAVEC, Franci. *et al.* Sustainable machining of high temperature Nickel alloy–Inconel 718: part 2–chip breakability and optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 941-952, 2015.
- PUSAVEC, Franci; KRAJNÍK, Peter; KOPAC, Janez. Transitioning to sustainable production–Part I: application on machining technologies. **Journal of Cleaner production**, v. 18, n. 2, p. 174-184, 2010.
- SECCO, Daniel de Carvalho; RODRIGUES, Alessandro Roger; MATSUMOTO, Hidekasu. Fresamento de aço para moldes e matrizes em condições criogênicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF. 9., 2017, Joinville. **Anais...** Joinville: ABCM, 2017.
- SENA, Rizelânia Kelly. **O impacto da usinagem criogênica na microestrutura de ferro fundido branco alto cromo caracterizada via EBSD**. 2023. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, 2023.
- STEFÁNSSON, Trausti. **Application of Cryogenic Coolants in Machining Processes: State-of-the-art Literature Study and Experimental Work on Metal Matrix Composite**. 2014. 51 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2014.
- ZINDANI, Divya; KUMAR, Kaushik. A brief review on cryogenics in machining process. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 6, p. 1107, 2020.

Resumo

Este trabalho aborda a automatização da soldagem MIG/MAG, com foco nos desafios e oportunidades associados à implementação do controle robótico nesse processo. O objetivo geral é investigar como a automação pode otimizar a qualidade e a eficiência das soldas, buscando responder à questão central sobre a viabilidade e os benefícios dessa tecnologia em contextos industriais. A metodologia utilizada inclui uma análise qualitativa baseada em revisão da literatura especializada, que proporciona uma compreensão abrangente das interações entre os parâmetros operacionais de soldagem e a influência da automação. As principais considerações finais indicam que, embora a automação apresente vantagens significativas, como a melhoria na precisão e a redução de custos operacionais, existem desafios relacionados à complexidade e aos custos iniciais de implementação, especialmente para pequenas e médias empresas. A pesquisa conclui que a automação na soldagem não só melhora a qualidade dos processos, mas também redefine o papel do operador humano, que passa a atuar em funções de supervisão e controle de qualidade. Recomenda-se que futuros estudos explorem práticas de implementação em diferentes contextos industriais e investiguem o impacto das novas tecnologias nas habilidades requeridas dos operadores, visando à adaptação às exigências do mercado.

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG, Parâmetros de Soldagem, Automatização, Controle Robótico.

Abstract

This paper addresses the automation of MIG/MAG welding, focusing on the challenges and opportunities associated with implementing robotic control in this process. The general objective is to investigate how automation can optimize weld quality and efficiency, aiming to answer the central question about the feasibility and benefits of this technology in industrial contexts. The methodology used includes a qualitative analysis based on a review of specialized literature, providing a comprehensive understanding of the interactions between welding operational parameters and the influence of automation. The main final considerations indicate that, while automation presents significant advantages, such as improved precision and reduced operational costs, there are challenges related to complexity and initial implementation costs, especially for small and medium-sized enterprises. The research concludes that automation in welding not only improves process quality but also redefines the role of the human operator, who shifts to supervisory and quality control functions. Future studies are recommended to explore implementation practices in different industrial contexts and investigate the impact of new technologies on the skills required of operators, aiming to adapt to market demands.

Keywords: MIG/MAG Welding, Welding Parameters, Automation, Robotic Control.



1. INTRODUÇÃO

Impulsionada pela busca contínua por eficiência e qualidade, a modernização das empresas em todo o mundo tem se intensificado. Especialmente com os avanços da quarta revolução industrial, as corporações têm adotado tecnologias que permitem um controle mais preciso de suas operações, concentrando esforços na otimização dos processos produtivos. A implementação dessas melhorias visa principalmente aumentar a produtividade, despertando um interesse significativo nas indústrias envolvidas na produção de componentes estruturais. Um dos focos centrais está na gestão precisa dos parâmetros de soldagem, com o objetivo de reduzir os custos associados a retrabalhos substancialmente. Essa abordagem visa não apenas a eficiência, mas também a qualidade e confiabilidade dos produtos. A quarta revolução industrial, popularmente descrita como Indústria 4.0, está transformando a maneira como as empresas operam, e a atenção à precisão e à inovação é fundamental para o sucesso nesse cenário em constante evolução.

A soldagem MIG/MAG, junto com outras técnicas de soldagem, é essencial na fabricação, com destaque nas indústrias automotiva, de petróleo e de construção metálica. Profissionais nessa área devem combinar habilidades de soldagem com conhecimento técnico para selecionar consumíveis e aplicar tecnologias de forma precisa. No cenário da Indústria 4.0, a integração desses processos é vital, permitindo que fábricas inteligentes realizem manutenções programadas, prevejam falhas e monitorem parâmetros como corrente e tensão. Isso eleva a eficiência e oferece rastreabilidade, permitindo identificar a origem de defeitos e assegurar a qualidade de cada componente.

A gestão minuciosa dos parâmetros oferece a minimização considerável da ocorrência de equívocos humanos durante ao processo de soldagem. Isso se torna especialmente crucial devido à escassez de profissionais altamente capacitados na área, levando muitos soldadores a ajustarem erroneamente as configurações para determinadas condições de soldagem devido à falta de conhecimento especializado. A automação do processo, apesar de desafios como custo e alcance limitado de robôs, supera a exaustiva operação manual. Células robotizadas buscam conforto ao soldador, mas a adoção no Brasil é retardada por não ser inicialmente vista como competitiva. Empresas que investem na automação aumentam a capacidade produtiva, reduzem erros, economizam custos e promovem qualidade, valorizando a marca e impactando a segurança, especialmente em soldas veiculares.

A automatização da soldagem MIG/MAG é um tema de extrema relevância no contexto industrial e tecnológico. A busca por maior eficiência, qualidade e redução de custos tem impulsionado a adoção de tecnologias automatizadas nesse campo. Portanto, compreender os desafios e oportunidades associados à implementação do controle robótico de parâmetros na soldagem MIG/MAG é crucial para o avanço da indústria e para a melhoria dos produtos. A soldagem MIG/MAG é amplamente utilizada devido à sua versatilidade e capacidade de produzir soldas de alta qualidade em diferentes materiais. No entanto, a precisão dos parâmetros de soldagem é essencial para garantir a integridade das estruturas e componentes. A automação, por meio de robôs e sistemas de controle, oferece a possibilidade de ajustar e monitorar esses parâmetros de forma mais precisa e consistente. Portanto, entender os desafios técnicos e operacionais dessa automação é fundamental para otimizar os processos industriais. Além disso, a pesquisa nesse campo pode contribuir significativamente para a sociedade e a comunidade acadêmica. Ao aprimorar a eficiência da soldagem, pode-se reduzir o desperdício de recursos, diminuir o impacto ambiental e melhorar a segurança dos trabalhadores. Além disso, a disseminação do conhecimento sobre automação e controle robótico beneficia a formação de profissionais qualificados

e impulsiona a inovação tecnológica. Portanto, este estudo tem o potencial de impactar positivamente a indústria, a economia e o desenvolvimento científico.

Diante da crescente adoção da automação na soldagem MIG/MAG, surge a necessidade de compreender os desafios e oportunidades na implementação eficaz do controle robótico de parâmetros. Quais são os desafios críticos e oportunidades associadas à implementação do controle robótico de parâmetros na soldagem MIG/MAG, considerando sua influência na eficiência, qualidade das soldas e custos operacionais?

O objetivo principal deste estudo foi compreender a aplicação da automatização na soldagem MIG/MAG, focando na otimização e no controle robótico dos parâmetros. Os objetivos específicos incluíram: entender os principais parâmetros da soldagem MIG/MAG convencional e suas influências na qualidade das soldas para identificar oportunidades de otimização; explorar as tecnologias robóticas disponíveis para automatizar o processo de soldagem MIG/MAG e como integrá-las de forma eficaz para garantir precisão e consistência dos parâmetros; e analisar o impacto da automação na segurança dos operadores e na manutenção dos equipamentos, avaliando os benefícios em termos de redução de retrabalhos, economia de recursos e aumento de produtividade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia empregada neste estudo consistiu em uma revisão bibliográfica, de natureza qualitativa e descritiva. A pesquisa foi conduzida através da consulta de livros, dissertações e artigos científicos, utilizando bases de dados específicas, tais como Scopus, IEEE Xplore, *Web of Science*, Scielo, Google Acadêmico e plataformas vinculadas à CAPES. O período de abrangência das obras considerou os últimos 10 anos anteriores ao ano de 2024, visando a inclusão de estudos recentes relevantes para a compreensão atualizada do tema. As palavras-chave adotadas na busca foram cuidadosamente selecionadas para refletir os elementos essenciais da pesquisa, incluindo termos como “Automatização”, “Soldagem MIG/MAG”, “Controle Robótico de Parâmetros”, entre outros, conforme a necessidade de abranger os diversos aspectos do estudo. Esse método, embora não exploratório, quantitativo, experimental ou de estudo de caso, proporcionou uma abordagem abrangente e aprofundada sobre a automatização na soldagem MIG/MAG.

2.2 Resultados e Discussão

Uma bancada de soldagem MIG (*Metal Inert Gas*) / MAG (*Metal Active Gas*) é adereçada por vários equipamentos que promovem a soldagem, os principais são: fonte de energia, tocha ou pistola de soldagem, unidade alimentadora de eletrodo (moto alimentador e carretel de arame), cilindro e mangueiras de gás de proteção e cabos de energia (Lacerda, 2021). A Figura 1 ilustra o envolvimento entre os equipamentos em uma bancada de soldagem MIG/MAG convencional.



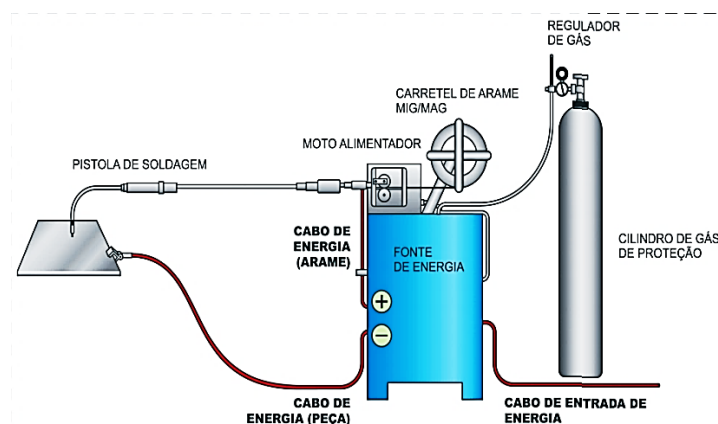


Figura 1. Equipamentos típicos de uma bancada de soldagem MIG/MAG

Fonte: RML Máquinas e Equipamentos, 2020

Vários autores experimentaram a automação ou robotização para otimizar a soldagem MIG/MAG, como Broering (2005) e Soares, Nascimento e Teixeira (2016), que notaram menor incidência de defeitos na solda, redução de custos e tempo de fabricação devido a essa melhoria. O processo MIG/MAG de soldagem pode ser facilmente automatizado (Rachadel, 2013). No Quadro 1, revisa-se a classificação dos tipos de operação de soldagem.

Ação	Tipo de Operação			
	Manual	Semimecanizada	Mecanizada	Automática
Abertura e manutenção do arco	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina
Alimentação de material	Soldador	Máquina	Máquina	Máquina
Controle de calor e penetração	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina
Deslocamento de tocha	Soldador	Soldador	Máquina	Máquina
Procura e seguimento da junta	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina
Direcionamento da tocha e do arco	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina
Correções e compensações	Soldador	Soldador	Soldador	Máquina (podendo ou não ocorrer)

Quadro 1. Tipos de operação de soldagem segundo a AWS

Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2011)

Alguns obstáculos do processo MIG são explicados por Silva (2019), e destaca-se a sensibilidade do arco aos parâmetros operacionais elétricos. A mínima alteração deles é diretamente refletida no cordão de solda, especialmente, em termos de qualidade. Se faz necessário o ajuste minucioso dos parâmetros para que o cordão de solda adquira determinadas qualidades, esses parâmetros são interdependentes, o que implica em dificuldade de manipulação dos mesmos sem que a solda sofra influências. Consequentemente, esse controle não dispensa a compreensão das relações entre as principais variáveis do processo MIG e a estabilidade do arco e o resultado da transferência metálica. O Quadro

2 relaciona as variáveis do processo MIG/MAG sobre a solda e sobre as demais variáveis simultâneas do próprio processo.

Variáveis	Influências da Variável
Corrente de soldagem (I)	Energia de soldagem (E_s); velocidade de alimentação do arame (V_A); modo de transferência metálica; penetração do metal de adição; aspectos geométricos e qualitativos do cordão de solda.
Tensão de soldagem (U)	Comprimento do arco; transferência metálica; formato do cordão de solda.
Velocidade de soldagem (V_s)	Penetração e tamanho do cordão de solda; E_s .
Comprimento energizado do eletrodo (stick out)	Aquecimento do arame; taxa de deposição e instabilidade do arco.
Vazão do gás de proteção (v)	Se inadequada, desprotege a solda e o arco elétrico, que podem assumir danos da contaminação por interação com a atmosfera ambiente. Quanto maior forem a corrente e a área da poça de fusão, maior deve ser a cobertura do gás.
Ângulo de soldagem	Largura, altura e penetração do cordão de solda.

Quadro 2. Principais parâmetros do processo MIG/MAG e suas influências

Fonte: Adaptado de Silva (2019)

Com base em Silva (2019), o Quadro 2 é organizado para relacionar as principais variáveis da soldagem MIG com suas influências entre si e no cordão de solda e compreende variáveis de grandezas distintas. Portanto, em vista de todas as influências explicadas, sabe-se que as características do cordão de solda são moldadas pela relação entre os parâmetros do processo.

Para manter a competitividade industrial e aumentar a durabilidade dos produtos, pesquisadores buscam aprimorar tecnologias e desenvolver soluções economicamente viáveis. Esse avanço requer não só novos equipamentos, mas também um controle rigoroso das variáveis do processo. Na soldagem, medir, controlar e otimizar essas variáveis é essencial para alcançar resultados de qualidade e eficiência, reduzindo o tempo de execução e minimizando defeitos. (Ali; El-Betar; Magdy, 2024). Com o aumento da competição no cenário global, produtividade e eficiência tornaram-se pilares fundamentais para a fabricação. Essa pressão é o que impulsiona a indústria de soldagem a buscar maior qualidade e eficácia, e a evolução para processos automatizados, como o uso de robôs de soldagem, desponta como uma tendência promissora (Penttilä *et al.*, 2019).

Assim como a variedade de tipos e posições de solda foi uma resposta necessária às demandas da indústria, a qualidade do processo pode ser afetada por múltiplos fatores ao longo da soldagem. Um dos fatores cruciais envolve as variáveis de entrada, como a corrente de soldagem, tensão, velocidade, taxa de calor, entre outros (Cai *et al.*, 2020). Quando esses parâmetros são adequadamente ajustados, uma solda perfeita se torna viável. Esse impacto significativo deve-se ao fato de que tais parâmetros possuem uma faixa de valores ajustáveis, sendo a base de todos os processos de soldagem. Para garantir reprodutibilidade e consistência, é fundamental que esses valores sejam documentados para cada tipo de solda. Parâmetros inadequados, por outro lado, podem resultar em respingos indesejados e demandar retrabalho, como limpeza adicional (Ali; El-Betar; Magdy, 2024). A preocupação com o controle da qualidade da soldagem tem sido um foco constante entre os pesquisadores (Nguyen *et al.*, 2020).

A soldagem automatizada realizada por robôs, com o apoio de sensores, assegura alta precisão, velocidade de ciclo aumentada e qualidade constante da solda. Esse processo também reduz a necessidade de intervenção humana, que se limita a posicionar ou remover a peça, iniciar o programa e realizar a inspeção visual das soldas ao final. A Figura 2 ilustra uma célula de soldagem robotizada, composta por um braço robótico (item a) com alimentação de arame, um posicionador para fixação da peça (item e), uma máquina de solda (item b), uma caixa de controle (item c) que integra sensores, programa e soldagem, e um painel de operação (item d), conectado à caixa de controle. O soldador utiliza o painel e a caixa de controle para iniciar o programa e monitorar informações, como tempo de ciclo, mensagens de erro, e dados de manutenção e segurança. (Faria; Filleti; Helleno, 2022).

Na elaboração de um processo de soldagem robotizada, é fundamental levar em conta diversos fatores. Entre eles, destacam-se o método de programação, que pode ser *on-line* ou *offline*, e a necessidade de planejar e otimizar a sequência das operações de solda. Além disso, é crucial definir e controlar parâmetros de soldagem, como corrente elétrica, tensão, velocidade de alimentação do arame e a distância *stick out*. A trajetória de soldagem deve ser cuidadosamente projetada para assegurar a consistência nos resultados. Esses elementos são essenciais para alcançar uma soldagem eficiente e de alta qualidade (Faria; Filleti; Helleno, 2022). Uma estrutura de soldagem genuinamente mecânica deve incluir três componentes fundamentais: sensores que monitoram o andamento do processo de soldagem; um modelo de processo que estabelece a relação entre os parâmetros de soldagem e a geometria do cordão; e uma estrutura de controle que analisa os dados coletados pelos sensores e ajusta os fatores do processo de soldagem com base nas informações do modelo (Chen; Lv, 2014).

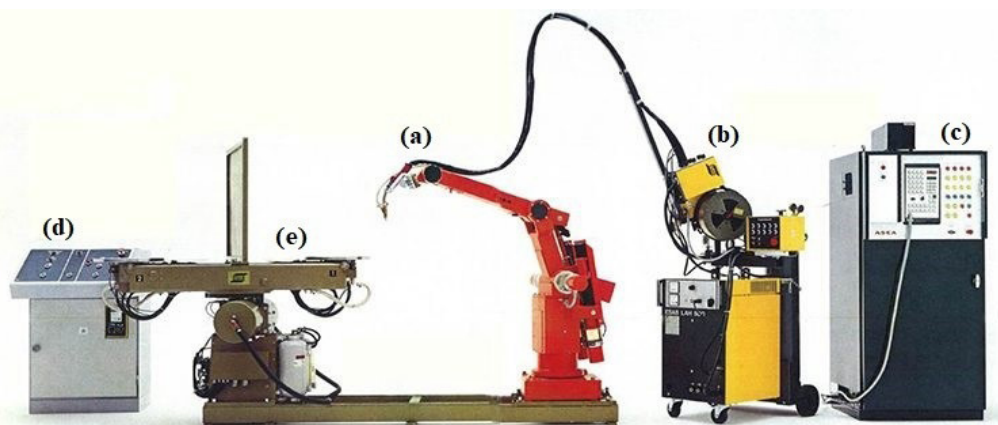


Figura 2. Célula de soldagem robótica industrial: (a) braço robótico, (b) máquina de solda, (c) caixa de controle, (d) painel de operação e (e) posicionador.

Fonte: Faria, Filleti e Helleno (2022)

A soldagem robótica é uma das aplicações mais comuns da robótica industrial, especialmente na indústria automotiva, onde processos como soldagem por ponto e MIG/MAG são amplamente utilizados. Pequenas empresas que produzem produtos personalizados também estão adotando essa tecnologia, exigindo soluções de soldagem rápidas e de alta qualidade. No entanto, a soldagem robótica ainda enfrenta desafios significativos. O processo é complexo e difícil de parametrizar, com muitos aspectos, como os efeitos nas juntas soldadas, não completamente compreendidos. A soldagem MIG/MAG, por exemplo, gera altas temperaturas em áreas localizadas, resultando em ciclos extremos de expansão e contração térmica que podem alterar as propriedades mecânicas dos materiais. Assim, embora a robótica tenha avançado nesse setor, ainda há muito a explorar em relação à otimização e controle dos processos de soldagem (Hong; Ghobakhloo; Khaksar, 2014).

Tradicionalmente, a movimentação da tocha de soldagem ao longo da costura era feita com a ajuda de um painel de ensino nos sistemas robóticos. Para que a soldagem ocorresse de forma eficaz, era necessário programar simultaneamente os parâmetros de soldagem, além de iniciar e desligar o arco e regular o gás de proteção, utilizando também o controlador do robô para uma soldagem fluida. No entanto, essa abordagem frequentemente resultava em erros no posicionamento da tocha e na qualidade da solda. Esses desafios podem ser superados com a implementação de sensores que realizam o rastreamento da costura e a inspeção da poça de fusão (Rout; Deepak; Biswal; 2019).

Para um diagnóstico eficaz de qualidade, é essencial um sistema de monitoramento de solda que rastreie parâmetros como corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de alimentação do arame, realizando medições constantes. Utilizando algoritmos avançados, o sistema analisa os dados em tempo real, permitindo detectar rapidamente problemas. Se a principal preocupação for a porosidade, o sistema pode ser ajustado para monitorar os parâmetros mais críticos, emitindo alertas quando uma solda não atinge os padrões de qualidade esperados. (Tedesco, 2022).

A soldagem, com sua física complexa, exige uma parametrização detalhada e cuidadosa, especialmente quando realizada de forma robótica. Diferente da soldagem manual, em que a experiência do operador e a observação direta facilitam o ajuste dos parâmetros, a soldagem robótica depende de sensores e configurações mais rígidas, o que tende a aumentar o tempo de parametrização. Nesse contexto, o trabalho de Couto *et al.* (2021) propõe o desenvolvimento de um sistema robotizado de soldagem flexível, que utiliza suporte à decisão baseado em conhecimento para otimizar a parametrização dentro de uma célula robótica avançada. O estudo, voltado especificamente ao aço estrutural, buscou reduzir a complexidade ao combinar programação *offline* avançada e sensorização aprimorada, permitindo maior precisão e controle no processo de soldagem a arco robótico.

A união de metais distintos por métodos tradicionais de soldagem apresenta desafios complexos, principalmente devido à alta entrada de calor e à estética do cordão de solda. O processo de Transferência de Metal a Frio (CMT), uma variante avançada da soldagem MIG, tem mostrado eficácia em superar esses problemas, oferecendo uma taxa de deposição elevada, acabamento estético superior e uma entrada de calor reduzida, que minimiza as distorções térmicas. Quando aplicada de forma robótica, a soldagem aprimora ainda mais as características microestruturais dos metais. Além disso, avanços em processos convencionais, como TIG e MIG, promovem benefícios adicionais, tais como maior penetração, controle da largura da zona afetada pelo calor (ZAC), qualidade do acabamento e diminuição de defeitos. Esses avanços demonstram o papel fundamental da automação e das novas técnicas no aperfeiçoamento da soldagem de materiais diferentes (Kavishwar *et al.*, 2024).

Toai, Chu e My (2021) apresentam um projeto de pesquisa focado no *design* e na implementação de um sistema robótico inovador, desenvolvido com o objetivo de substituir operadores humanos na soldagem de peças complexas montadas em um suporte em série. O artigo explora tanto o *design* geral quanto os detalhes técnicos do robô, além de abordar os principais achados experimentais que fundamentam sua implementação e demonstram sua eficácia em aplicações piloto. Os autores evidenciam que o protótipo do robô foi implementado e testado com sucesso utilizando métodos de soldagem TIG, MIG e MAG. Os resultados indicam que o uso do robô em uma célula de soldagem não só reduz os custos de produção, como também eleva a qualidade final do produto e promove uma otimização na alocação de mão de obra, destacando o impacto positivo da automação no processo de soldagem industrial.



A integração da robótica à soldagem transformou as fábricas, aumentando a qualidade e consistência dos processos. Essa união não só acelera a produção como também diminui o tempo ocioso das máquinas, resultando em maior lucratividade. Com os avanços das tecnologias digitais, os sistemas de soldagem tornaram-se mais eficientes e adaptáveis, viabilizando sua aplicação tanto em grandes indústrias quanto em pequenas empresas. A soldagem automatizada costumava ser viável apenas para grandes lotes devido aos altos custos de configuração. No entanto, com a chegada de sistemas flexíveis que combinam programação intuitiva e células automatizadas, até pequenas empresas que produzem volumes menores podem aproveitar a automação. Esses sistemas modernos são mais acessíveis e proporcionam um retorno sobre o investimento mais rápido, com soluções que facilitam a troca de produção entre peças diferentes. Assim, empresas de diversos portes podem automatizar seus processos repetitivos com mais eficiência e lucratividade (Hong; Ghobakhloo; Khaksar, 2014).

A integração de robôs aos processos de soldagem oferece vantagens como redução de custos e qualidade aprimorada, especialmente em produções de pequeno e médio porte. Ela garante desempenho consistente e flexível, adaptável a outras técnicas de fabricação e mudanças no volume e design da produção. Sensores integrados monitoram a qualidade da solda, substituindo trabalho manual em ambientes perigosos, beneficiando até mesmo empresas menores. O rastreamento de costura permite identificar a posição do cordão de solda, guiando o robô com precisão ao longo do processo. Essa operação pode ser realizada com diferentes tipos de sensores, cada um com suas vantagens e desvantagens, empregando seus métodos para extrair características do cordão de solda. Dessa forma, os sensores desempenham um papel fundamental na automação completa da soldagem robótica, proporcionando monitoramento em tempo real dos parâmetros do processo e *feedback* imediato para análises e tomada de decisões técnicas/operacionais (Rout; Deepak; Biswal; 2019).

Tedesco (2022) relata que, em um procedimento de soldagem operando de forma eficaz, os gastos são geralmente distribuídos entre o trabalho manual, materiais consumíveis, matérias-primas, gás de proteção, consumo de energia, entre outros. Os sistemas de gestão de informações de soldagem podem auxiliar na detecção de problemas de qualidade no início do processo, diminuindo, assim, os custos de manutenção subsequentes. Soldas perdidas ou com defeitos podem ocasionar um impacto adverso, resultando em possíveis perdas de receita relacionadas a falhas. Ao identificar esses problemas precocemente, as empresas têm a oportunidade de administrar os custos e manter altos níveis de produtividade. Um sistema sofisticado de gestão de informações contribui para evitar perdas de produtividade e defeitos na qualidade do produto, e os benefícios e economias a longo prazo são justificáveis para as empresas ao considerarem os custos iniciais em comparação com as soldas perdidas (Miller, 2015).

Adicionalmente, conforme Miller (2015), para converter os dados coletados em termos financeiros, as organizações podem analisar os períodos de tempo, apresentando em percentuais as horas de soldagem, quantidade de arame utilizado ou gás de proteção consumido, por exemplo. Com base nos valores inseridos pelo usuário, os cálculos são realizados a partir dos dados coletados, abrangendo tanto o trabalho manual quanto os materiais utilizados. Dessa forma, permite que a administração da empresa avalie as mudanças de produtividade e quantifique um valor para a solda.

A análise dos desafios e oportunidades associados à implementação do controle robótico na soldagem MIG/MAG se apoia em contribuições de diversos autores que fornecem menções fundamentais para a compreensão desse contexto. A principal vantagem observada é a melhoria na precisão e na qualidade das soldas com a utilização de senso-

res e controle automático, conforme mencionado por Chen e Lv (2014) e corroborado por Rout, Deepak e Biswal (2019). Esses autores destacam a importância de um sistema de controle capaz de monitorar variáveis críticas em tempo real, minimizando a necessidade de ajustes manuais e garantindo um processo mais consistente.

Por outro lado, o custo inicial e a complexidade de implementação são citados como desafios significativos, principalmente para pequenas empresas. Nesse sentido, Tedesco (2022) discute como sistemas automatizados têm se tornado mais acessíveis, possibilitando a adoção por pequenas e médias indústrias que antes não tinham acesso a essas tecnologias. A flexibilidade proporcionada por sistemas modernos, como a troca rápida de peças e a adaptabilidade a diferentes requisitos de produção, é vista como uma oportunidade de crescimento e competitividade para empresas de menor porte.

Os resultados apresentados não apenas evidenciam a necessidade de um gerenciamento eficaz das variáveis de soldagem, mas também ilustram como a evolução das tecnologias de soldagem se alinha com as exigências do mercado atual. A crescente pressão por produtividade e qualidade tem impulsionado as indústrias a adotarem processos automatizados, um movimento destacado por Penttilä *et al.* (2019), que consideram a automação um passo essencial para o futuro da soldagem.

A discussão em torno da soldagem MIG/MAG revela que a compreensão das interações entre os parâmetros operacionais é crucial. Os dados coletados corroboram a teoria de que pequenas variações nas condições de soldagem podem levar a resultados significativamente diferentes. Isso reforça a necessidade de formação contínua para os operadores e a implementação de sistemas de monitoramento que assegurem a aderência aos parâmetros estabelecidos, como enfatizado por Nguyen *et al.* (2020) em suas investigações sobre controle de qualidade.

Além disso, a análise dos modos de transferência metálica e a sua influência nas características do cordão de solda sublinham a complexidade do processo de soldagem. Isso se alinha com os desafios identificados por Silva (2019), que destaca a necessidade de um controle rigoroso e da interdependência das variáveis, criando um cenário em que o sucesso do processo de soldagem depende não apenas da tecnologia utilizada, mas também do conhecimento e da habilidade do operador.

Outro aspecto relevante é o impacto na segurança e nos custos operacionais. Miller (2015) aborda como o controle automatizado, ao reduzir falhas e retrabalhos, melhora a qualidade e diminui custos a longo prazo, enquanto Hong, Ghobakhloo e Khaksar (2014) apontam a necessidade de superar a complexidade de parametrização como um obstáculo para a plena realização dos benefícios da automação. Esses pontos confirmam que, embora existam desafios técnicos e operacionais, a automação robótica é uma tendência crescente, que oferece ganhos substanciais de produtividade e segurança, especialmente em processos repetitivos e de alta demanda.

Assim, a partir das perspectivas trazidas por esses estudos, conclui-se que a automação na soldagem MIG/MAG não apenas oferece uma oportunidade para otimizar a qualidade e reduzir custos, mas também redefine o papel do operador humano, que passa a atuar em funções de supervisão e controle de qualidade, em vez de executar diretamente o processo de soldagem.



3. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste trabalho teve como objetivo investigar a automação da soldagem MIG/MAG, focando em como o controle robótico pode otimizar a qualidade e a eficiência do processo de soldagem. Os objetivos propostos foram alcançados, evidenciando que a automação não apenas melhora a precisão e a consistência das soldas, mas também redefine o papel dos operadores, que passam a atuar em funções de supervisão e controle de qualidade. Essa transformação é essencial em um cenário industrial cada vez mais exigente, onde a pressão por produtividade e qualidade é crescente.

Entretanto, o estudo também identificou limitações, como a complexidade e os altos custos iniciais associados à implementação de sistemas automatizados, que podem representar um obstáculo para pequenas e médias empresas. Além disso, a análise revelou que, embora a tecnologia esteja disponível, a sua adoção requer não apenas investimento financeiro, mas também um esforço significativo em formação e treinamento dos operadores, o que pode ser um fator limitante para a implementação efetiva. Como resposta ao problema de pesquisa proposto, foi possível concluir que a automação na soldagem MIG/MAG oferece uma oportunidade valiosa para otimizar processos, reduzir custos a longo prazo e aumentar a segurança nas operações. No entanto, é fundamental que as empresas considerem as particularidades de sua operação e a necessidade de formação contínua para seus funcionários, de modo a maximizar os benefícios da automação.

Para futuros trabalhos, recomenda-se uma investigação aprofundada sobre as melhores práticas de implementação da automação em contextos de diferentes portes e segmentos industriais. Além disso, estudos adicionais podem explorar o impacto da evolução tecnológica nas habilidades necessárias dos operadores e como isso pode influenciar a formação profissional na área de soldagem. A continuidade dessa pesquisa é vital para que as indústrias possam se adaptar às novas demandas do mercado e aproveitar plenamente os avanços oferecidos pela automação.

REFERÊNCIAS

- ALI, Radwa; EL-BETAR, Ahmed; MAGDY, Mahmoud. A review on optimization of autonomous welding parameters for robotics applications. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-22, 2024.
- BROERING, Carlos Eduardo. **Desenvolvimento de sistemas para a automação da soldagem e corte térmico**. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CAI, Wang. *et al.* Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature. **Journal of Manufacturing systems**, v. 57, p. 1-18, 2020.
- CHEN, S. B.; LV, N. Research evolution on intelligentized technologies for arc welding process. **Journal of manufacturing processes**, v. 16, n. 1, p. 109-122, 2014.
- COUTO, Tiago. *et al.* Otimização de aprendizado de máquina para parametrização de soldagem robótica. In: **Conferência Internacional IEEE 2021 sobre Sistemas e Competições de Robôs Autônomos (ICARSC). IEEE, 2021. págs. 137-142.**
- FARIA, Isabella Cristina Souza; FILLETI, Remo Augusto Padovezi; HELLENO, André Luís. Evolução dos Processos de Automação em Células de Soldagem: Uma Revisão da Literatura. **Soldagem & Inspeção**, v. 27, p. e2704, 2022.
- HONG, Tang Sai; GHOBAKHLOO, Morteza; KHAKSAR, Weria. Robotic welding technology. **Comprehensive materials processing**, v. 6, n. February, p. 77-99, 2014.

KAVISHWAR, Samrat. *et al.* Estudos abrangentes sobre técnicas convencionais e novas de revestimento de solda e suas variantes para melhorar a integridade estrutural: uma visão geral. **Soldagem Internacional**, v. 38, n. 9, p. 618-638, 2024.

LACERDA, Caio Resende de. **Otimização de parâmetros de soldadura GMAW utilizando o método Taguchi com a análise relacional de Grey**. 2021. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Portugal, Bragança, 2021.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. 363 p.

MILLER. **Understanding the True Cost of Weld Defects**. [S. l.], 17 dez. 2015. Disponível em: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-real-cost-of-missed-or-defective-welds>. Acesso em: 07 maio. 2024.

NGUYEN, Quyen. *et al.* Experimental investigation of temperature field and fusion zone microstructure in dissimilar pulsed laser welding of austenitic stainless steel and copper. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 56, p. 206-215, 2020.

PENTTILÄ, Sakari. *et al.* Artificial neural network controlled GMAW system: Penetration and quality assurance in a multi-pass butt weld application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 7, p. 3369-3385, 2019.

RACHADEL, Bernardo João. **Estudo para a otimização da soldagem MIG/MAG robotizada de peças em aço inoxidável ferrítico conformadas por estampagem**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

ROUT, Amruta; DEEPAK, B. B. V. L.; BISWAL, B. B. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. **robotics and computer-integrated manufacturing**, v. 56, p. 12-37, 2019.

SOARES, João Cláudio Ferreira; NASCIMENTO, Andrew José de Lima; TEIXEIRA, Fátima Geísa Mendes. Automação do processo de soldagem manual semiautomático GMAW visando melhoria de qualidade do produto. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 3., 2016, Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos** [...] Brasília: Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA). Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2016/mecanica-e-metalurgica>. Acesso em: 17 jul. 2024.

SILVA, William Constantino da. **Avaliação microestrutural de Zonas Parcialmente Diluídas obtidas por soldagem dissimilar empregando os metais de adição Inox 309L e Inconel 625**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Soldagem MIG/MAG aplicações, equipamentos e técnicas. **RML Máquinas e Equipamentos**, São Paulo, 12 out. 2020. Disponível em: <https://www.rmlmaquinas.com.br/loja/noticia.php?loja=762235&id=45>. Acesso em: 01 ago. 2024.

TEDESCO, Leonardo Boldrini. **Tecnologias da indústria 4.0 aplicados à soldagem e os desafios de sua implementação**. 2022. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022.

TOAI, Truong Trong; CHU, Duc-Hoang; MY, Chu Anh. Development of a new 6 DOFs welding robotic system for a specialized application. **Further Advances in Internet of Things in Biomedical and Cyber Physical Systems**, p. 135-150, 2021.

YONGBIN, Yang. *et al.* Comparison of the artificial neural network model prediction and the experimental results for cutting region temperature and surface roughness in laser cutting of AL6061T6 alloy. **Infrared Physics & Technology**, v. 108, p. 103364, 2020.



Resumo

Este artigo investiga as cargas atuantes no trem de pouso de aeromodelos, com o objetivo de identificar materiais adequados que assegurem segurança e eficiência nas operações. A pesquisa é de natureza aplicada, utilizando uma abordagem qualitativa e métodos descritivos, centrando-se em revisão bibliográfica e análise das propriedades dos materiais. Os resultados revelam que a adoção de compósitos de fibra de carbono, em substituição ao alumínio, proporciona uma combinação superior de resistência e leveza, crucial para o desempenho em decolagens e pousos. Além disso, a escolha entre trens de pouso retráteis e fixos é discutida em termos de suas especificidades operacionais, destacando a importância de um *design* adequado. As conclusões indicam que, embora os objetivos do estudo tenham sido atingidos, limitações na análise de condições reais foram identificadas. Recomenda-se a realização de estudos futuros com testes práticos para verificar as propriedades dos materiais em uso real. Assim, o trabalho não apenas contribui para o entendimento teórico sobre trens de pouso em aeromodelos, mas também oferece direções práticas para otimização na aviação de modelos reduzidos, ressaltando a importância da seleção criteriosa de materiais e do *design* estrutural.

Palavras-chave: Trem de Pouso, Aeromodelo, Requisitos de Carga, Considerações Estruturais.

Abstract

This article investigates the loads acting on aeromodel landing gear, with the objective of identifying suitable materials that ensure safety and efficiency in operations. The research is applied in nature, using a qualitative approach and descriptive methods, focusing on a literature review and analysis of material properties. The results reveal that the adoption of carbon fiber composites, in place of aluminum, provides a superior combination of strength and lightness, crucial for performance during takeoff and landing. Furthermore, the choice between retractable and fixed landing gear is discussed in terms of their operational specifics, highlighting the importance of proper design. The conclusions indicate that, while the study's objectives were achieved, limitations in the analysis of real-world conditions were identified. Future studies with practical tests are recommended to verify the properties of materials in actual use. Thus, the work not only contributes to the theoretical understanding of landing gear in aeromodels but also offers practical directions for optimization in model aircraft aviation, emphasizing the importance of careful material selection and structural design.

Keywords: Landing Gear, Aeromodel, Load Requirements, Structural Considerations.



1. INTRODUÇÃO

A utilização de trens de pouso em aeromodelos é um elemento crucial na concepção e operação dessas aeronaves em escala reduzida. Compreender os requisitos de carga e as considerações estruturais associadas a esses componentes é fundamental para garantir a segurança e o desempenho durante as fases de decolagem, voo e pouso. Nesse contexto, este estudo propõe uma revisão da literatura focada nos aspectos relacionados aos trens de pouso para aeromodelos, explorando os requisitos de carga impostos por diferentes condições de voo, bem como as considerações estruturais necessárias para suportar tais cargas. Por meio desta análise, busca-se fornecer uma visão abrangente sobre o tema, destacando os principais desafios enfrentados na concepção e implementação de trens de pouso eficientes e confiáveis para aeromodelos.

A evolução dos trens de pouso em aeromodelos tem sido influenciada por avanços tecnológicos, demandas de desempenho e requisitos de segurança, refletindo uma busca contínua por soluções que otimizem a operacionalidade e a durabilidade desses componentes. Assim, compreender as diferentes abordagens de projeto e os materiais empregados na construção desses sistemas é essencial para garantir sua eficácia em diversas condições operacionais. Este estudo visa abordar tais aspectos, fornecendo uma análise detalhada das práticas atuais e das tendências emergentes na área de trens de pouso para aeromodelos. Além disso, a presente revisão bibliográfica se propõe a explorar também a aplicação de métodos de modelagem e simulação no projeto e análise estrutural de trens de pouso para aeromodelos, destacando-se a importância dessas ferramentas para prever o comportamento mecânico desses componentes sob diferentes cargas e condições de operação. Ao examinar estudos de caso e exemplos práticos, pretende-se ilustrar a relevância e a aplicabilidade dessas abordagens na melhoria do desempenho e na segurança dos aeromodelos em geral.

A concepção eficiente de trens de pouso para aeromodelos é fundamental não apenas para a comunidade científica, mas também para os entusiastas e praticantes do aeromodelismo, assim como para a indústria aeroespacial. O estudo desses componentes é crucial devido à sua influência direta no desempenho, segurança e estabilidade dos aeromodelos durante todas as fases de voo, desde a decolagem até o pouso. Ao compreender os requisitos de carga e as considerações estruturais envolvidas na concepção dos trens de pouso, os pesquisadores podem contribuir significativamente para o avanço do conhecimento nesse campo específico, além de promover conhecimentos relevantes para o aprimoramento contínuo das aeronaves em escala reduzida.

A relevância desta pesquisa reside na necessidade de desenvolver trens de pouso mais eficientes e confiáveis, capazes de lidar com uma variedade de condições operacionais e demandas de voo. Ao investigar os fatores que afetam o desempenho e a estabilidade dos aeromodelos durante as fases críticas de decolagem e pouso, esta pesquisa pode oferecer orientações práticas para projetistas e fabricantes na criação de aeromodelos mais seguros e robustos. Além disso, ao explorar os avanços tecnológicos e metodológicos na área de trens de pouso para aeromodelos, este estudo pode contribuir para o desenvolvimento de soluções inovadoras no campo de Mecânica Aplicada, especialmente na aviação em escala reduzida. Em termos de contribuições para a sociedade e a comunidade acadêmica, esta pesquisa tem o potencial de aprimorar a segurança e a eficiência dos aeromodelos, promovendo uma prática mais segura e acessível para entusiastas de todas as idades. Além disso, ao disseminar os resultados e as descobertas desta pesquisa por meio de publicações científicas e eventos acadêmicos, espera-se que ela possa guiar novas investigações e

colaborações interdisciplinares, enriquecendo o corpo de conhecimento e impulsionando o avanço contínuo do aeromodelismo e da engenharia aeroespacial.

Ultimamente, houve um notável aumento no interesse pelo aeromodelismo, tanto como uma atividade de lazer quanto como uma ferramenta de pesquisa e desenvolvimento por meio da exploração dos princípios da aviação em uma escala reduzida. Com o avanço da tecnologia, o mercado de aeromodelismo tem testemunhado uma proliferação de modelos cada vez mais complexos e sofisticados, oferecendo uma ampla gama de opções para pilotos de todos os níveis de habilidade. No entanto, a otimização do desempenho e da estabilidade desses aeromodelos, especialmente durante as fases críticas de decolagem e pouso, continua sendo um desafio para os projetistas e entusiastas. Nesse contexto, surgiu o seguinte problema de pesquisa: quais os efeitos das características do trem de pouso no desempenho e a estabilidade de aeromodelos durante as fases de decolagem e pouso?

O objetivo deste trabalho foi compreender os requisitos de carga e as considerações estruturais envolvidas no projeto de trens de pouso para aeromodelos, visando contribuir para o desenvolvimento de aeromodelos mais seguros, estáveis e eficientes. Para alcançar esse objetivo, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos: discutir os diferentes tipos de cargas que o trem de pouso pode enfrentar durante o voo e o pouso, bem como a variação dessas cargas de acordo com as características do aeromodelo; apresentar os principais métodos de modelagem e simulação utilizados na avaliação do desempenho estrutural do trem de pouso, com ênfase em como essas técnicas poderiam otimizar o *design*; e explorar os principais materiais empregados na fabricação do trem de pouso e as considerações de projeto que garantem sua resistência e durabilidade.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para esta pesquisa consistiu em uma revisão bibliográfica qualitativa e descritiva. Essa abordagem envolveu a pesquisa e análise crítica da literatura relevante disponível em livros, artigos científicos, dissertações e teses acadêmicas, além de materiais técnicos e documentos relacionados ao tema. Os locais de busca incluíram diversas bases de dados acadêmicas e bibliotecas virtuais, como Google Scholar, Scopus, Web of Science, Scielo, entre outros, para garantir uma ampla cobertura de informações relevantes. Também foram consultados sites de instituições acadêmicas e técnicas, bem como revistas especializadas e conferências na área de engenharia aeroespacial e aeromodelismo. O período dos artigos pesquisados foi focado nos últimos dez anos. As palavras-chave utilizadas na busca foram selecionadas com base nos principais conceitos relacionados ao tema, tais como “Trem de Pouso”, “Aeromodelo”, “Requisitos de Carga”, “Considerações Estruturais”, entre outras, para garantir a precisão e abrangência da pesquisa.

2.2 Resultados e Discussão

O aeromodelismo é uma atividade que se popularizou tanto no Brasil quanto internacionalmente, atraindo entusiastas que apreciam o voo de miniaturas de aeronaves como um *hobby*. Este passatempo é amplamente utilizado para lazer e competições. Embora possa parecer apenas uma forma de entretenimento, o aeromodelismo envolve um apro-



fundado estudo das miniaturas, que serve de base para o desenvolvimento de aeronaves empregadas em diversas finalidades. Esse campo exige conhecimento técnico e habilidades específicas para a construção e o controle dos modelos, refletindo práticas aplicáveis a aviões de tamanho real (Neto, 2021; Gonçalves, 2016).

Na arquitetura e engenharia, antes de se construir um componente final, é essencial realizar estudos e análises de desempenho para entender seu funcionamento e construção. Nesse contexto, os aeromodelos desempenham um papel crucial ao simular o voo de um avião, ajudando a prever sua trajetória e comportamento no ar. Eles permitem avaliar como a aeronave reagirá às leis da física e a diversos fatores ambientais, como chuva, ventos fortes e altitude. Essas simulações ajudam a identificar potenciais obstáculos ou vantagens que podem influenciar a qualidade do voo, garantindo uma melhor preparação e otimização do desempenho da aeronave real (Neto, 2021).

Um projeto aeronáutico envolve diversas áreas especializadas. A aerodinâmica determina o perfil das asas para otimizar a eficiência do voo. A área de cargas e estruturas avalia a integridade estrutural, buscando um equilíbrio ideal entre peso e resistência às condições ambientais. As especialidades de estabilidade e controle definem as partes móveis da aeronave para assegurar uma resposta segura aos comandos de voo. O sistema propulsor seleciona o motor e a hélice adequados para fornecer a potência e velocidade necessárias conforme os requisitos da aeronave (Kfiatkovski, 2022).

O aeromodelo é composto por diversos elementos que desempenham funções específicas, como o motor e a hélice, responsáveis por impulsionar o aeromodelo, permitindo que ele decole, mantenha-se em voo ou execute procedimentos de pouso. O trem de pouso, fixado na fuselagem, suporta o aeromodelo no solo, enquanto suas rodas facilitam o deslocamento sem gerar arrasto excessivo. A asa, acoplada à parte superior da fuselagem e equipada com ailerons, é essencial para a sustentação durante o voo, desempenhando um papel crucial na estabilidade e manobrabilidade da miniatura. A fuselagem, o corpo central do aeromodelo, abriga todos os outros componentes, formando a estrutura completa. O estabilizador horizontal, localizado na parte traseira, inclui o profundor, que controla o movimento de subida e descida, sendo fundamental para decolagens e pousos seguros. O estabilizador vertical, também situado na parte traseira, abriga o leme, responsável pelo controle da direção lateral do aeromodelo, sem provocar rotação angular indesejada (Neto, 2021). A distribuição dos componentes de um avião é ilustrada na Figura 1.

O sistema de trem de pouso desempenha um papel crucial na absorção da energia cinética gerada durante o impacto do pouso e durante o taxiamento da aeronave. Essa energia é dissipada de diversas formas: parte é absorvida pelo atrito das rodas com o solo, enquanto outra parte é absorvida pelos amortecedores de choque ou pela deformação elástica da estrutura do trem de pouso. Durante o projeto, é essencial que o trem de pouso seja robusto o bastante para suportar o peso total da aeronave durante o pouso, porém, o principal objetivo é torná-lo o mais leve possível. Para alcançar essa leveza, uma ampla gama de materiais é empregada, incluindo ligas de aço, alumínio, magnésio, entre outros. Essa seleção meticulosa de materiais visa garantir não apenas a resistência necessária, mas também a eficiência energética e a segurança durante todas as fases do voo (Abeling, 2016).

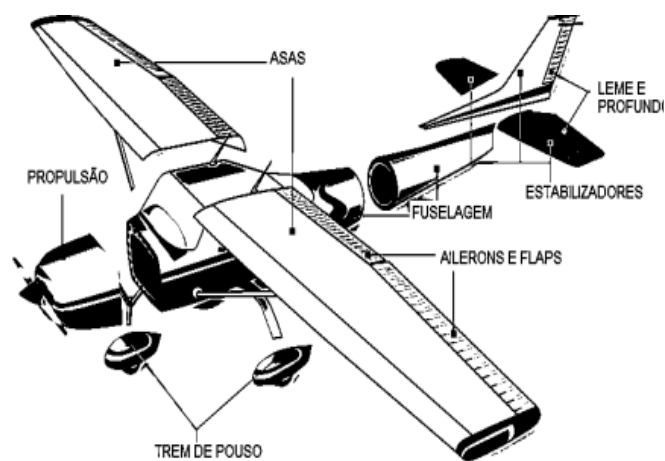


Figura 1. Componentes de uma aeronave

Fonte: Abeling (2016, p. 16)

Para desempenhar suas funções de forma eficaz, o conjunto do trem de pouso é composto por diversos elementos interligados. Essa montagem geralmente inclui a estrutura, as rodas e os freios, podendo variar entre configurações fixas, retráteis ou semi-retráteis. Em aeronaves de pequeno porte, é comum encontrar trem de pouso fixo, que, apesar de sua praticidade, gera um arrasto maior durante o voo. A Figura 2 oferece uma representação visual dos componentes básicos do conjunto do trem de pouso, apresentando uma vista detalhada em uma configuração típica de triciclo fixo, com estrutura sólida-flexível para o trem principal e uma roda de bequilha na frente. Essa configuração exemplifica a complexidade e a interconexão dos elementos que compõem o sistema de trem de pouso em uma aeronave (Abeling, 2016).

Kfiatkovski (2022) explora os fenômenos dinâmicos envolvidos no impacto do trem de pouso com o solo durante o processo de pouso e aterragem de uma aeronave. Ele discute conceitos fundamentais da mecânica, como quantidade de movimento, momento angular e o princípio do impulso, utilizando equações para descrever esses fenômenos em um contexto bidimensional. A quantidade de movimento é definida como a soma das quantidades de movimento de todos os pontos constituintes de um corpo rígido, enquanto o momento angular é o produto do momento de inércia do corpo em relação a um eixo que passa por um ponto e a sua velocidade angular. O autor também define o impulso como o somatório das forças aplicadas a um corpo durante intervalos de tempo, demonstrando como a quantidade de movimento e o momento angular sofrem mudanças ao longo do tempo devido às forças aplicadas. Esses conceitos são cruciais para compreender o comportamento dinâmico de uma aeronave durante a fase de pouso e aterragem, e são amplamente aplicados na análise e no projeto de sistemas de trem de pouso e estruturas aeronáuticas.

O processo de cálculo e dimensionamento da estrutura aeromodelo começa com a compreensão das diversas forças que atuam sobre ele durante o voo. Durante o voo, seis forças principais impactam a estrutura da aeronave, cada uma exercendo um papel específico. Estas forças incluem a força de sustentação (representada por L), aplicada no centro da asa para manter a aeronave no ar; o arrasto do avião (D), que é a resistência ao movimento enfrentada pela aeronave; o momento em relação ao ponto 0 (M_0), que descreve o momento resultante em torno de um ponto de referência; a força aerodinâmica exercida pela cauda (P), importante para manter a estabilidade longitudinal da aeronave; o peso total da aeronave (W), que atua para baixo devido à gravidade; e a força gerada pelo motor (T), representando a potência propulsora do motor da aeronave (Liang et al. 2021;

Kfiatkovski, 2022). Todas essas forças estão ilustradas na Figura 3, proporcionando uma visão abrangente das interações complexas que ocorrem durante o voo de um aeromodelo.

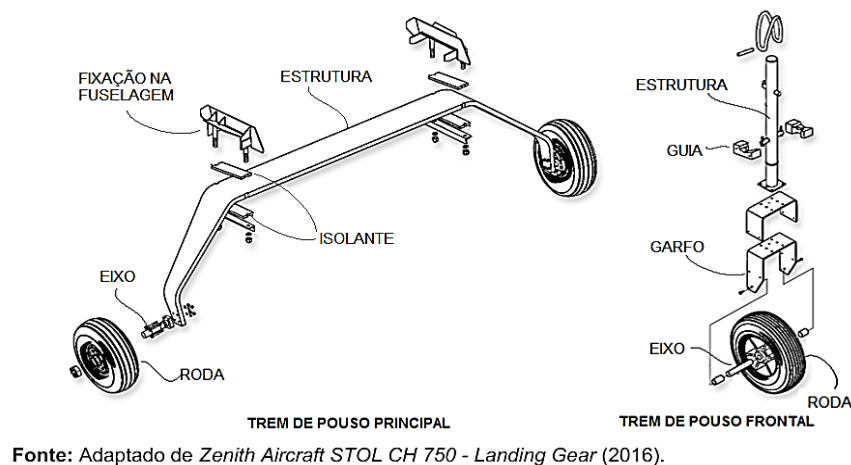


Figura 2. Esquema de um conjunto de trem de pouso

Fonte: Abeling (2016, p. 19)

O trem de pouso de nariz de uma aeronave deve ser capaz de suportar cargas tanto verticais quanto horizontais durante o pouso. Há três situações possíveis de pouso que influenciam diretamente o comportamento do trem de pouso. No pouso nivelado, o trem de pouso de nariz e as rodas principais tocam o solo ao mesmo tempo, distribuindo a carga de maneira equilibrada. No pouso onde apenas as rodas principais tocam o solo com a bequilha próxima ao chão, o trem de pouso de nariz não absorve carga imediata, e as rodas principais suportam a maior parte do peso. Já no cenário com a empenagem abaixada, o trem de pouso de nariz praticamente não recebe carga, ficando as rodas principais responsáveis pelo impacto. Em todas as situações, o dimensionamento adequado do trem de pouso é crucial para garantir a integridade estrutural e a segurança da aeronave (Guedes, 2016; Liang et al. 2021).

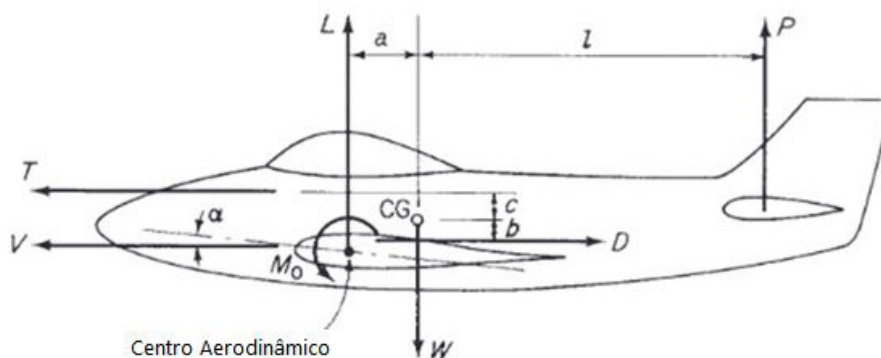


Figura 3. Esquema de atuação de forças sobre um aeromodelo

Fonte: Kfiatkovski (2022, p. 4)

O trem de pouso é crucial para sustentar a aeronave em solo e facilitar as manobras de decolagem e pouso (Suresh et al., 2023). Ele deve absorver os impactos verticais e horizontais, especialmente durante o pouso, evitando que forças severas sejam transmitidas para a fuselagem, o que poderia causar danos. Por isso, deve ser projetado para dissipar essas tensões, minimizando o impacto na estrutura da aeronave. Ao desenvolver o trem de pouso, é necessário considerar resistência, estabilidade e rigidez, garantindo que ele suporte as cargas sem comprometer a segurança. Esse processo inclui análises rigorosas

da resistência a impactos, sendo o método dos elementos finitos amplamente utilizado para validar a integridade estrutural, especialmente em estruturas compostas, e assegurar que atende aos padrões de segurança e durabilidade (Lancea *et al.*, 2022). As dimensões do trem de pouso da roda principal, no qual as duas rodas principais são montadas, são mostradas na Figura 4. Por sua vez, a Figura 5 mostra um teste mecânico destrutivo em modelos de trem de pouso, o teste de flexão de três pontos, para determinar suas propriedades mecânicas.

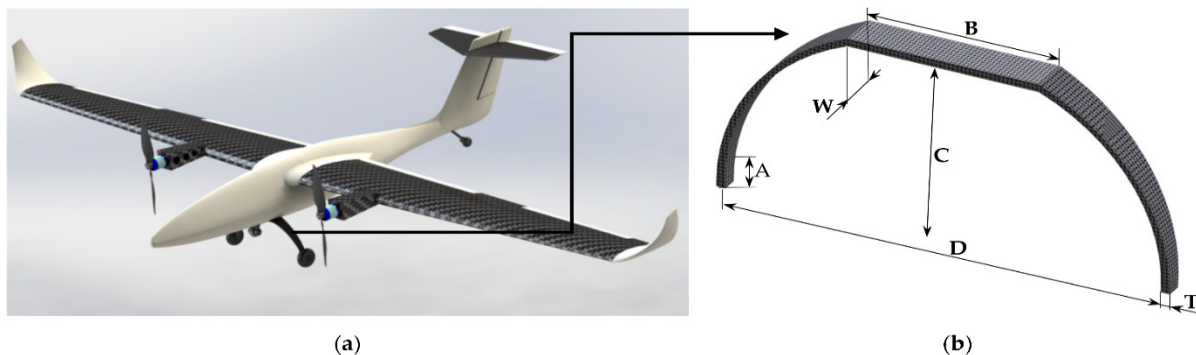


Figura 4. Sistema de trem de pouso: (a) localização no aeromodelo; (b) medidas estruturais

Fonte: Lancea *et al.* (2022, p. 3)



Figura 5. Ensaio de flexão em três pontos para trens de pouso feitos de: (a) PLA GF; (b) CFRP

Fonte: Lancea *et al.* (2022, p. 5)

Os trens de pouso são responsáveis por sustentar a aeronave durante operações em solo, como decolagens, pousos, taxiamento e manutenção. Devido à necessidade de manter um peso mínimo e uma distância reduzida do solo, essas estruturas são finas e apresentam uma resposta dinâmica significativa às cargas aplicadas no solo. Como o trem de pouso é um dos poucos sistemas da aeronave que não possui redundâncias, entender sua dinâmica é essencial para o projeto e a segurança da aeronave. A simulação da dinâmica do trem de pouso é fundamental na análise das cargas que a aeronave enfrenta, tanto as verticais durante o pouso quanto as longitudinais e laterais geradas por frenagens, manobras e reboques. Outro aspecto importante a ser considerado são as vibrações do trem de pouso, que podem ser provocadas por frenagens, pelo contato dos pneus ao pousar ou pelo acoplamento das dinâmicas dos pneus em movimento com a mecânica estrutural das pernas do trem de pouso (Krüger; Morandini, 2011).

Todos esses efeitos são fortemente influenciados por vários parâmetros, como a velocidade da aeronave, a deflexão vertical do trem de pouso, a pressão dos pneus e o desgaste das peças. Muitos desses fatores são difíceis de quantificar e podem variar durante a ope-

ração da aeronave, tornando a investigação numérica um desafio. Existem métodos de análise tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. Embora a análise de estabilidade seja mais simples com métodos de domínio da frequência, essa abordagem ainda é frequentemente utilizada. No entanto, em muitos casos, as não linearidades predominam, resultando em características de ciclo limite nas vibrações (Krüger; Morandini, 2011).

O dimensionamento do trem de pouso representa um dos maiores desafios no projeto de aeronaves. Embora não desempenhe uma função ativa durante o voo, ele se torna um componente crucial devido às forças envolvidas na aterrissagem. Por isso, é essencial que o conjunto seja o mais leve possível, evitando peso extra que possa aumentar o consumo de combustível. Ao mesmo tempo, ele deve ser capaz de suportar e amortecer o impacto, dissipando a energia gerada durante a aterrissagem (Abeling, 2016).

O teste de queda do trem de pouso reproduz o processo de aterrissagem de uma aeronave, liberando o trem de pouso sobre uma mesa de reação a partir de uma altura elevada em condições laboratoriais. Isso garante que as características de amortecimento, os parâmetros de projeto e a confiabilidade estrutural estejam em conformidade com os requisitos de *design* (Fang; Zhu; Wang, 2022). Como uma etapa vital de verificação no desenvolvimento do trem de pouso, cada novo trem de pouso deve ser validado por meio desse teste de queda, que é regulamentado por requisitos específicos em normas civis e militares, assegurando a padronização e a validade (Liu; Wang, 2024).

A simulação do teste de queda do trem de pouso é uma ferramenta valiosa que permite analisar previamente as características de amortecimento desse componente antes do teste oficial. Essa abordagem ajuda na preparação para o teste, reduzindo riscos, encurtando o ciclo de desenvolvimento e diminuindo custos. Além disso, a análise pode ser aplicada a cenários operacionais reais, não se restringindo apenas às condições do teste. Assim, pode-se examinar cenários de pouso mais específicos, garantindo uma abordagem abrangente no projeto e aumentando a segurança da aeronave. Por isso, esse tema tem sido uma prioridade na área de *design* de trens de pouso (Krüger; Morandini, 2011; Correia; Ferreira, 2021).

A tecnologia de simulação do teste de queda do trem de pouso, ou simulação de pouso, se tornou uma ferramenta essencial no desenvolvimento das cargas de pouso, tanto para a estrutura do trem de pouso quanto para a fuselagem da aeronave, especialmente em grandes aeronaves civis. Em geral, os testes e as simulações se validam e corrigem mutuamente. Uma análise do panorama atual da pesquisa nessa área revela que, na última década, muitos pesquisadores publicaram seus resultados sobre testes de queda do trem de pouso ou técnicas de simulação. Esses estudos experimentais costumam ser realizados em conjunto com estudos de simulação, evidenciando sua complementaridade e importância mútua (Liu; Wang, 2024).

Atualmente, a abordagem mais avançada em simulação e análise é a simplificação da dinâmica do trem de pouso para um sistema com múltiplos graus de liberdade, que é composto por vários blocos de massa. Essa metodologia envolve a formulação das equações de movimento de Newton-Euler, que são resolvidas por meio de uma linguagem de programação (Richards; Erickson, 2019; McDonald *et al.*, 2020). Os principais benefícios dessa técnica incluem princípios matemáticos mais claros e consolidados, além de uma resolução mais rápida dos programas. No entanto, essa abordagem também apresenta desvantagens, como a necessidade de um estudo teórico mais aprofundado e uma menor escalabilidade ao trabalhar com outros sistemas de simulação (Richards; Erickson, 2019).

Além do método convencional, a dinâmica de múltiplos corpos (*multi-body dynamics*

- MBD) e a tecnologia de protótipos virtuais, que estão se desenvolvendo rapidamente, são empregadas para simular o teste de queda do trem de pouso. Essa área tem se tornado um foco importante de pesquisa atualmente. Entre suas vantagens, destacam-se a facilidade de uso, a visualização em 3D e a boa integração com outras tecnologias de engenharia assistida por computador (*computer-aided engineering* – CAE). Os *softwares* de MBD exibem interfaces poderosas, que criam novas oportunidades para o desenvolvimento de simulações em nível de aeronave, aliadas à tecnologia de sistemas múltiplos (Correia; Ferreira, 2021).

Normalmente, busca-se um trem de pouso que seja leve, mas que também tenha resistência suficiente para suportar as cargas durante a decolagem e o pouso. Tradicionalmente, o alumínio tem sido o material preferido para a fabricação de trens de pouso, mas agora os compósitos de fibra de carbono estão sendo vistos como uma alternativa viável, graças à sua excelente relação entre resistência e peso, além de sua alta resistência à tração (Shukla *et al.*, 2022).

O trem de pouso é um componente crucial de uma aeronave, pois enfrenta as maiores cargas estruturais durante o pouso, tornando seu *design* fundamental. Com várias configurações adaptadas às necessidades específicas, os engenheiros buscam constantemente reduzir o peso para melhorar o desempenho, a capacidade de carga e a eficiência do combustível. Avanços em materiais compostos de polímero reforçado com fibra possibilitaram a introdução de componentes leves com alta relação resistência-peso em comparação com os convencionais. Embora algumas aeronaves leves utilizem suportes de trem de pouso fixos e não retráteis, sistemas retráteis são essenciais para atender às demandas de voos prolongados. Materiais compósitos são amplamente utilizados em diversas indústrias devido ao seu baixo peso e alta resistência. Os compósitos reforçados com fibras representam uma solução inovadora que surge das ciências aplicadas e da tecnologia. Esses materiais são elaborados a partir de dois ou mais constituintes, cada um com propriedades químicas e físicas distintas, que não se fundem nem se dissolvem, preservando suas identidades individuais. Isso resulta em um compósito com fases contínuas e descontínuas: a fase contínua é conhecida como matriz, enquanto a fase descontínua é chamada de reforço. O reforço pode ser composto de fibras longas, fibras curtas ou partículas (Ahmad *et al.*, 2022).

A investigação bibliográfica sobre as cargas atuantes no trem de pouso de aeromodelos e a escolha de materiais adequados são fundamentais para a segurança e eficiência das aeronaves. No contexto do problema de pesquisa e objetivos delineados, autores como Shukla *et al.* (2022) e Ahmad *et al.* (2022) oferecem contribuições valiosas que sustentam as discussões. Shukla *et al.* (2022) abordam a tradicional preferência pelo alumínio na construção de trens de pouso, destacando, no entanto, a emergência dos compósitos de fibra de carbono como uma alternativa inovadora. Esses materiais são reconhecidos por sua excelente relação entre resistência e peso, o que é crucial para o desempenho dos aeromodelos durante decolagens e pousos. Essa mudança no entendimento sobre materiais atende diretamente ao objetivo de pesquisa de identificar soluções que garantam a integridade estrutural e a eficiência dos trens de pouso. Isso reflete uma tendência crescente na aviação, onde a eficiência se torna um foco central. Os resultados evidenciam que a estrutura do trem de pouso deve ser projetada para suportar forças significativas durante a decolagem e o pouso, ressaltando a importância do *design* adequado para garantir a integridade estrutural sob condições extremas.

Ahmad *et al.* (2022) discutem a estrutura dos compósitos, explicando que eles são formados por dois ou mais constituintes que preservam suas identidades individuais, resultando em um material com propriedades mecânicas superiores. Essa característica é

fundamental para o projeto de trens de pouso que devem suportar forças significativas. A pesquisa de Ahmad *et al.* (2022) é particularmente relevante, pois demonstra que a evolução na utilização de compósitos não apenas melhora a resistência, mas também permite uma significativa redução de peso, beneficiando a performance dos aeromodelos. Além disso, a escolha entre trens de pouso retráteis e fixos, mencionada por Shukla *et al.* (2022), ressalta a necessidade de considerar as especificidades operacionais ao projetar essas estruturas.

Essa reflexão alinha-se aos objetivos do estudo, que buscam não apenas entender as cargas, mas também otimizar o *design* para diferentes contextos de voo. Os resultados evidenciam que a estrutura do trem de pouso deve ser projetada para suportar forças significativas durante a decolagem e o pouso, ressaltando a importância do *design* adequado para garantir a integridade estrutural sob condições extremas. O apanhado bibliográfico quanto aos materiais de construção de trem de pouso complementa essa análise ao enfatizar que os compósitos não apenas atendem aos requisitos de resistência, mas também permitem uma redução de peso, crucial para a performance dos aeromodelos. A utilização de compósitos representa um avanço significativo, mas a análise contínua de suas propriedades em condições reais é necessária para garantir sua eficácia e viabilidade a longo prazo. Além disso, a escolha entre trens de pouso retráteis e fixos, destaca uma evolução no *design* para atender a diferentes demandas operacionais. Essa inovação pode aumentar a eficiência durante voos prolongados, mas traz desafios em termos de durabilidade e manutenção (Ahmad *et al.*, 2022). Em síntese, a pesquisa confirma que a seleção adequada de materiais é fundamental para otimizar o desempenho e a segurança dos aeromodelos, alinhando-se à questão do problema e objetivos desta pesquisa.

3. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal investigar as cargas atuantes no trem de pouso de aeromodelos e a seleção de materiais adequados, buscando otimizar a segurança e a eficiência das aeronaves. Ao longo da pesquisa, foi possível afirmar que os objetivos propostos foram alcançados, evidenciando a relevância dos compósitos de fibra de carbono em relação aos materiais tradicionais, como o alumínio. Essa transição para novos materiais não apenas atende às exigências de resistência, mas também proporciona uma significativa redução de peso, fator essencial para o desempenho dos aeromodelos.

A pesquisa proporcionou uma compreensão mais profunda das especificidades operacionais na escolha entre trens de pouso retráteis e fixos. Embora ambos os *designs* apresentem vantagens e desvantagens, a adequação do trem de pouso às características do voo e às necessidades de manutenção se mostrou crucial para a longevidade e a funcionalidade dos aeromodelos. Apesar de os objetivos terem sido cumpridos, é importante reconhecer que limitações foram encontradas, especialmente na análise das propriedades dos materiais em condições reais de operação. O estudo baseou-se predominantemente em investigações teóricas e revisões bibliográficas, o que pode ter restringido a abrangência das conclusões.

As recomendações deste estudo incluem a necessidade de pesquisa adicional em ambientes práticos, onde as interações reais entre os materiais e as forças atuantes podem ser observadas. Propostas de trabalhos futuros podem explorar a implementação de testes em voo para avaliar a performance dos compósitos sob diferentes condições de operação. Além disso, a análise de novos *designs* de trens de pouso, que integram tecnologias emergentes e inovação nos materiais, pode ser uma via promissora para garantir ainda

mais eficiência e segurança nos aeromodelos.

Em resumo, a pesquisa confirma que a seleção de materiais e o *design* estrutural adequado dos trens de pouso são fatores determinantes para o sucesso das operações de aeromodelos. Ao refletir sobre os objetivos e resultados obtidos, conclui-se que o estudo não apenas contribui para o entendimento acadêmico, mas também oferece direções práticas para melhorias na aviação de aeromodelos.

REFERÊNCIAS

- ABELING, Ariel. **Dimensionamento de um conjunto trem de pouso para Aerodesign**. 2016. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Horizontina, 2016.
- AHMAD, Muhammad Ayaz *et al.* Selection methodology of composite material for retractable main landing gear strut of a lightweight aircraft. **Applied Sciences**, v. 12, n. 11, p. 5689, 2022.
- GUEDES, Bruno César da Silva. **Projeto Aerodesign** 2016. 2016. 102f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica e de Automóvel) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- CORREIA, Diogo; FERREIRA, Adelino. Aircrafts on-ground dynamics models and simulation software: State-of-the-art. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9147, 2021.
- FANG, Wei; ZHU, Lingang; WANG, Youshan. Landing performance study for four wheels twin tandem landing gear based on drop test. **Aerospace**, v. 9, n. 7, p. 334, 2022.
- GONÇALVES, Luiz Fernando. **Projeto estrutural de um aeromodelo nos requisitos da competição SAE Brasil aerodesign – Classe Regular**. Pato Branco/PR – Edição do autor, 2016.
- KFIATKOVSKI, Rafael Huttner. Projeto de trem de pouso de um avião nos requisitos competição SAE Brasil aerodesign – divisão de acesso. [S. l.]: **Universidade Positivo**, 2022. 15 p.
- KRÜGER, Wolf R.; MORANDINI, Marco. Recent developments at the numerical simulation of landing gear dynamics. **CEAS Aeronautical Journal**, v. 1, p. 55-68, 2011.
- LANCEA, Camil. *et al.* Simulation, fabrication and testing of UAV composite landing gear. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8598, 2022.
- LIANG, Yen-Chu. *et al.* Design and manufacture of composite landing gear for a light unmanned aerial vehicle. **Applied Sciences**, v. 11, n. 2, p. 509, 2021.
- LIU, Wenbin; WANG, Youshan. Improved Multi-Body Dynamic Simulation of Landing Gear Drop Test Incorporating Structural Flexibility and Bearing Contact. **Aerospace**, v. 11, n. 7, p. 543, 2024.
- MCDONALD, Max. *et al.* Carrier Landing Simulation using Detailed Aircraft and Landing. In: **AIAA SciTech 2020 Forum**. 2020. p. 1138.
- NETO, Osmar da Costa e Silva. **Construção de um aeromodelo e suas aplicações Científicas**. 2021. 40 f. Monografia (Graduação em Tecnologia da Informação) – Universidade Federal Rural do Semi-árido, Pau dos Ferros, 2021.
- RICHARDS, Phillip W.; ERICKSON, Andrew. Dynamic Ground Loads Analysis Using Detailed Modeling of Landing Gear and Aircraft Aeroservoelastics. In: **AIAA SciTech 2019 Forum**. 2019. p. 0759.
- SHUKLA, Hardik. *et al.* Analyses of Rear Landing Gear of a UAV Using Carbon Fibre Composites. **ECS Transactions**, v. 107, n. 1, p. 16157, 2022.
- SURESH, P. S. *et al.* Synthesis of landing dynamics on land-base high performance aircraft considering multi-variate landing conditions. **Mechanics Based Design of Structures and Machines**, v. 51, n. 7, p. 3945-3964, 2023.



Resumo

O presente artigo analisa a usinagem a plasma, destacando-a como uma tecnologia inovadora e eficiente que apresenta grande potencial para a indústria, especialmente quando comparada a métodos convencionais de usinagem. O estudo tem como objetivo principal identificar as barreiras mais significativas que dificultam a adoção dessa técnica pelas empresas, com uma abordagem focada nos desafios de ordem técnica, econômica e operacional. Para isso, foi utilizada uma metodologia de revisão bibliográfica, que permitiu a coleta e análise de informações a partir de estudos recentes sobre o tema. O trabalho explora as características e aplicações do plasma, enfatizando sua versatilidade no corte de materiais diversos, incluindo aqueles de diferentes espessuras, e sua adequação a uma ampla gama de necessidades industriais. Os resultados obtidos evidenciam que, apesar de suas vantagens marcantes, como maior rapidez, precisão e capacidade de corte em condições desafiadoras, a usinagem a plasma ainda enfrenta obstáculos para sua implementação. Entre os principais desafios estão o controle rigoroso dos parâmetros de corte, a manutenção específica dos equipamentos e os custos associados, fatores que podem comprometer a produtividade e a viabilidade econômica em certos contextos. Com base nas análises realizadas, o artigo aponta que a superação dessas dificuldades pode representar um avanço significativo para a indústria, permitindo que a usinagem a plasma seja mais amplamente empregada e contribua de forma decisiva para ganhos em eficiência, qualidade e competitividade na manufatura moderna.

Palavras-chave: Tecnologia, Desafios, Implementação, Manufatura.

Abstract

This article analyzes plasma machining, highlighting it as an innovative and efficient technology that presents great potential for the industry, especially when compared to conventional machining methods. The study's main objective is to identify the most significant barriers that hinder the adoption of this technique by companies, with an approach focused on technical, economic and operational challenges. To this end, a literature review methodology was used, which allowed the collection and analysis of information from recent studies on the subject. The work explores the characteristics and applications of plasma, emphasizing its versatility in cutting diverse materials, including those of different thicknesses, and its suitability for a wide range of industrial needs. The results obtained show that, despite its remarkable advantages, such as greater speed, precision and cutting capacity in challenging conditions, plasma machining still faces obstacles to its implementation. Among the main challenges are the strict control of cutting parameters, specific maintenance of the equipment and associated costs, factors that can compromise productivity and economic viability in certain contexts. Based on the analyses carried out, the article points out that overcoming these difficulties could represent a significant advance for the industry, allowing plasma machining to be more widely used and contributing decisively to gains in efficiency, quality and competitiveness in modern manufacturing.

Keywords: Technology, Challenges, Implementation, Manufacturing.



1. INTRODUÇÃO

A usinagem a plasma tem se destacado como uma técnica de fabricação altamente eficiente e versátil. Utilizando plasma, um estado energizado da matéria. Sua capacidade de realizar cortes, soldagens e revestimentos com eficiência a posiciona como uma solução inovadora e promissora.

Neste contexto, o presente estudo visa explorar as inovações, aplicações e potencialidades dessa tecnologia, utilizando uma abordagem de revisão bibliográfica criteriosa para oferecer uma visão ampla sobre seu estado atual e as oportunidades de avanço.

A escolha do tema justifica-se pela importância estratégica da usinagem a plasma, pois ainda é uma técnica subutilizada em relação a métodos tradicionais. A pesquisa busca investigar as razões por trás dessa subutilização e propor soluções para superar os desafios encontrados na implementação deste processo. Além disso, esta pesquisa tem o potencial de gerar contribuições significativas tanto para a sociedade quanto para a comunidade acadêmica.

O problema de pesquisa centra-se na baixa utilização da usinagem a plasma, apesar de seus benefícios evidentes em termos de precisão, rapidez e versatilidade. A questão que norteia esta investigação é: por que a usinagem por plasma ainda é tão pouco aplicada na indústria moderna? Para responder a essa pergunta, é necessário examinar as dificuldades técnicas, econômicas e operacionais que afetam sua adoção.

O objetivo geral desta pesquisa é compreender as principais dificuldades enfrentadas por organizações que adotam a usinagem por plasma em seus processos de fabricação, visando identificar os desafios específicos e as barreiras que impactam a implementação bem-sucedida dessa tecnologia em empreendimentos industriais.

Entre os objetivos específicos estão identificar dos principais obstáculos enfrentados pelas organizações ao adotar a usinagem por plasma em seus processos de fabricação, compreendendo as barreiras técnicas, econômicas e operacionais. Analisar os métodos de usinagens não convencionais e suas peculiaridades. E investigar a evolução histórica da usinagem por plasma, desde seus primórdios até os avanços mais recentes.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada para este estudo foi uma revisão bibliográfica qualitativa e descritiva. Esse tipo de pesquisa é fundamental para compreender e sintetizar o conhecimento existente sobre o tema da usinagem a plasma, sem a necessidade de realizar experimentos ou estudos de caso específicos. Os materiais utilizados para a revisão bibliográfica incluíram livros, artigos científicos e documentos técnicos relevantes, acessados por meio de bases de dados acadêmicas e científicas, como IEEE Xplore, ScienceDirect, Capes, Google Scholar e Scielo. O período dos artigos pesquisados abrangeu os últimos 10 anos, de 2014 a 2024. As palavras-chave utilizadas na busca foram selecionadas com base nos principais conceitos e aspectos relacionados ao tema, tais como “usinagem a plasma”, “corte por plasma”, “tecnologia de plasma”, “aplicações industriais do plasma”, entre outros termos.

2.2 Resultados e Discussão

A otimização de processos visando maior produtividade sem a perda de qualidade tem sido um dos principais objetivos das empresas. Além disso, de acordo com Jhonatan Dos Santos Cardoso (2021, p. 7), o avanço dos sistemas de produção no Brasil deu origem a um mercado altamente competitivo na área de manufatura, caracterizado por ser mais flexível, adaptável, produtivo, econômico, ágil e de maior qualidade.

É de saber geral, que o desenvolvimento de técnicas e processos de corte se tornou mais eficaz e rápido comparado a outros processos. O uso desta tecnologia está sendo cada vez mais utilizada nas indústrias em geral, principalmente na indústria do “metal-mecânica”. (Silva; Gasparotto; Moutin, 2019).

Dentro desse cenário, encontram-se indústrias que produzem um alto volume de produtos e buscam o máximo de eficiência na fabricação de peças e ferramentas para usos diversos. Dessa forma, para Mougo, Campos e Silva (2018, p.1) o processo de corte em chapas metálicas é de extrema importância devido às suas diversas aplicações na indústria. A precisão e a qualidade desse processo dependem principalmente da execução adequada da trajetória de corte e da velocidade correspondente, além do ajuste correto da ferramenta utilizada.

O corte a plasma pode ser tanto manual como mecanizado. O corte manual se caracteriza pela condução da tocha ser realizada por um operador, como em um processo de soldagem. Já o corte mecanizado é caracterizado pela manipulação automatizada da tocha, que permite corte mais precisos e de geometrias complexas. (Niada, 2020).

Niada (2020, p.10) afirma que no processo manual, a qualidade do corte depende do operador, ocasionando erros e aumentando o tempo de ciclo de produção. Alguns erros comuns que ocorrem no corte manual são devidos a alterações na velocidade de corte e distância entre o bico de corte e o material a ser cortado, esses erros resultam em imperfeições de forma, chanframento indesejado, rebarbas excessivas e regiões onde não há separação total do material.

Existem também os perigos associados ao corte a plasma, que são similares ao relacionados ao processo de soldagem a arco e oxi-corte. Entre estes podemos citar os riscos elétricos, a formação de gases prejudiciais e fumos e ao alto nível de ruído. Além disso, os riscos físicos potenciais, como as altas pressões dos gases e o sistema de água devem ser levados em consideração. (Suedt; Larios; Costa, 2015).

Para Suedt, Larios e Costa (2015, p. 103) os equipamentos de proteção coletiva que compõem o sistema de segurança de um equipamento tem por foco principal assegurar que o colaborador não tenha contato com as partes perigosas das máquinas de corte preservando a saúde humana. E essas proteções se mostraram eficazes com influência direta na funcionalidade do equipamento, tanto para segurança, quanto para produtividade.

Kashiwagi (2016, p.6) descreveu que o processo de corte por plasma pertence a uma parte de cortes térmicos e aplica-se em diferentes campos da engenharia mecânica, estaleiros e tecnologia de processo. Os requisitos necessários para um corte desejado são: assegurar a qualidade das peças por meio de geometria de corte, ter uma pequena zona termicamente afetada (ZTA) na região do corte, possuir pequena perda de massa e baixa formação de escórias.

Segundo Ricardo Krombauer (2019, p. 10), nos últimos anos, o processo de corte a plasma teve um grande aumento de demanda devido ao seu baixo investimento e alta produtividade. No entanto, em comparação com o processo de corte a laser, sua precisão

nas geometrias deixa um pouco a desejar.

Apesar disso, entende-se que:

O processo de corte por plasma tem se mostrado de grande eficiência no processo fabril devido a sua versatilidade de aplicação, tendo como característica positiva a gama de espessuras que podem ser usinadas em uma única máquina. O acabamento do corte depende muito dos parâmetros utilizados, qualidade do ar e geometria de corte, sendo assim cada peça tem suas particularidades de corte, algumas das variáveis mais importantes para o processo de corte são a corrente, velocidade de corte, fluxo e pressão do gás de plasma, distância entre bocal e peça e as características da tocha (Garlet; Tünnermann; Loch, 2020, p. 1).

O processo consiste na utilização do calor liberado por uma coluna de plasma, gerado pelo aquecimento de um gás em alta vazão rotacional. Esse plasma é então direcionado para o metal a ser cortado, causando sua fusão pelo calor intenso. O material fundido é expulso com o auxílio do gás em alta vazão, permitindo assim o corte preciso das peças. (Garlet; Tünnermann; Loch, 2020).

O sistema de corte plasma utiliza uma tocha, composta geralmente por um difusor ou distribuidor de gás feito de material isolante, cujo objetivo principal é conferir rotação ao gás. Um eletrodo conduz a corrente até um inserto de háfnio, que emite elétrons para gerar o plasma. Um bico direciona e concentra o plasma para o metal a ser cortado. A capa mantém os consumíveis alinhados e isola a parte elétrica do bocal frontal. O bocal frontal guia o fluxo de ar coaxial e, por ser refrigerado e isolado, pode ser apoiado na peça. (Garlet; Tünnermann; Loch, 2020).

A qualidade da superfície cortada por plasma depende dos ajustes e parâmetros de corte, como a altura do bocal em relação à superfície da peça, o ângulo de inclinação da tocha, a velocidade de corte, o fluxo de gás e a habilidade do operador. No corte automatizado, o operador só precisa posicionar a tocha e acionar o gatilho. As peças cortadas a plasma podem ser usadas imediatamente ou soldadas para produção de itens finais. É essencial que as superfícies cortadas estejam livres de falhas para evitar a necessidade de limpeza adicional, como usinagem ou lixamento. (Mougo; Campos; Silva, 2018).

Para Krombauer (2019), o processo de corte por arco plasma (PAC) é amplamente utilizado para cortar chapas metálicas em diversas formas. Ele é frequentemente empregado na indústria devido à capacidade de integração com sistemas de controle numérico computadorizado (CNC), permitindo cortes precisos e automatizados.

Desde o surgimento do processo de corte a plasma, um dos principais desafios enfrentados pelos equipamentos é o calor gerado pelo arco elétrico, que pode resultar no aquecimento excessivo do metal. Isso pode levar à deformação e curvatura do material, alterando a distância em relação ao bico de corte. Devido à natureza não linear do arco de corte, qualquer desalinhamento em relação ao bico pode resultar em deformações nas paredes do corte, variações geométricas na peça, formação de escória, perda do arco elétrico, colisão do bico e desgaste prematuro dos consumíveis. (Krombauer, 2019).

Para Krombauer (2019, p. 11), os fatores mencionados podem resultar em perdas para as empresas que possuem esse tipo de equipamento, podendo impactar negativamente na produtividade e qualidade dos produtos fabricados por meio dele.

Embora este processo seja frequentemente considerado relativamente simples, a falta de conhecimento ou controle por parte do operador, bem como a qualidade dos consu-

míveis, podem resultar em retrabalhos ou perdas de produção. Se os parâmetros básicos do processo não forem seguidos, a qualidade do corte e da geometria pode ser diretamente afetada. (Garlet; Tünnermann; Loch, 2020).

O processo de corte a plasma pode enfrentar uma série de problemas. Enquanto alguns podem ser prontamente solucionados, outros são mais desafiadores em sua resolução. (Krombauer, 2019).

Os principais problemas relacionados à qualidade de corte estão detalhados no manual fornecido pelo fabricante da fonte e podem estar relacionados a diversos fatores. Em certos casos, a origem do problema pode ser um parâmetro inserido incorretamente pelo operador ou até mesmo um desgaste excessivo do bocal ou eletrodo além de sua vida útil predeterminada. (Krombauer, 2019).

De acordo com Soares, Nascimento e Gimenes (2016, p. 10) a evolução do uso do arco elétrico e a introdução do plasma a ar, que utiliza ar comprimido como gás de plasma, o corte a plasma substituiu o oxicorte (outro método de usinagem não convencional) em vários segmentos industriais ao redor do mundo, devido ao aprimoramento do sistema, por ser mais seguro e acessível e, principalmente, por melhorar o acabamento do corte. O háfnio é empregado em substituição ao tungstênio devido à resistência à oxidação em altas temperaturas, e o plasma é considerado o quarto estado da matéria, possibilitando o corte de vários materiais, já que alcança temperaturas superiores a 15.000 °C.

Outro fator significativo que pode causar problemas são as impurezas nos gases usados no processo. Em fontes convencionais, o gás empregado é o próprio ar, obtido por meio de compressores. Durante a compressão, as moléculas de água presentes no ar podem se condensar sob pressão, criando umidade nas tubulações. Essa umidade pode chegar até a tocha e contaminar o arco, resultando em danos e desgaste prematuro dos bocais e eletrodos. Para prevenir esse tipo de problema, é recomendável o uso de filtros e secadores nas linhas de ar comprimido. (Krombauer, 2019).

Esses problemas costumam ter soluções relativamente simples, já que, ao adotar as medidas adequadas, é fácil chegar a uma resolução. No entanto, existem casos mais complexos, como aqueles relacionados ao ângulo de corte, que estão diretamente ligados à altura do bocal em relação à chapa cortada. (Krombauer, 2019).

Para Garlet, Tünnermann e Loch (2020, p. 8), o processo de corte a plasma é altamente versátil e possui uma ampla gama de aplicações, pois é capaz de cortar materiais de diferentes espessuras e alcançar áreas que podem ser inacessíveis por meio de outros processos ou ferramentas.

3. CONCLUSÃO

Este estudo investigou a usinagem a plasma, destacando-a como uma tecnologia inovadora e com grande potencial transformador para a indústria moderna. Os objetivos propostos foram alcançados na medida em que o trabalho identificou e analisou os principais desafios técnicos, econômicos e operacionais que limitam sua ampla adoção. Entre esses desafios, destacam-se a complexidade no controle de parâmetros de corte, a necessidade de manutenção especializada e os custos associados, fatores que afetam diretamente a viabilidade econômica e a produtividade em diferentes contextos industriais.

A resposta ao problema de pesquisa revela que a baixa aplicação da usinagem a plasma na indústria moderna, apesar de suas vantagens evidentes, está relacionada a fatores como o alto custo de manutenção dos equipamentos e a falta de mão de obra especiali-



zada para operar o maquinário. Além disso, o controle inadequado de parâmetros como a velocidade de corte, a distância do bocal em relação à peça e a pressão do gás de plasma pode gerar problemas como imperfeições nas peças, desperdício de material e aumento no desgaste dos consumíveis, o que impacta negativamente a produtividade e a qualidade do processo. Esses aspectos, detalhados no desenvolvimento do artigo, evidenciam que a usinagem a plasma, embora promissora, exige investimentos significativos em capacitação técnica e em infraestrutura para ser plenamente aproveitada.

Entretanto, o estudo apresentou limitações, pois a metodologia foi restrita à revisão bibliográfica, sem aplicação prática ou experimental. Isso sugere que pesquisas futuras podem explorar abordagens experimentais para validar as análises apresentadas. Como recomendação, propõe-se o desenvolvimento de equipamentos e metodologias mais intuitivas e acessíveis, bem como a integração da usinagem a plasma com sistemas automatizados. Tais avanços poderiam ampliar sua aplicação, permitindo que essa tecnologia contribua de maneira mais decisiva para a eficiência, qualidade e competitividade na manufatura moderna.

REFERÊNCIAS

- CARDOSO, J. S. **Análise dos parâmetros do processo de usinagem por plasma dos aços**. 2021. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luís, 2021.
- GARLET, D.; TÜNNERMANN, J. E.; LOCH, J. W. **Corte a plasma – Plasma arc machining**. 2020. Disponível em: https://www.academia.edu/44453137/corte_a_plasma_plasma_arc_machining. Acesso em: 21 mar. 2024.
- GUINTER, Edson Luis. **Polimerização de anidrido maleico ativado por plasma gerado em gaiola catódica**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- KASHIWAGI, Fabio Norikazu. **Estudos em corte por plasma usando delineamento de experimentos**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- KROMBAUER, R. **Implementação de um sistema de controle da tensão do arco plasma para equipamentos de corte CNC**. 2019. 48 f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação), Faculdade Horizontina, Horizontina, 2019.
- MOUGO, A. L.; CAMPOS, G. A. P.; SILVA, J. C. A. **Estudo da qualidade do corte a plasma automatizado para o aço AISI 304**. Contribuição técnica ao 73º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.
- NIADA, H. S. **Projeto de uma máquina de corte a plasma para uso no corte de chapas de aço inox ABNT 304**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020.
- SILVA, B. M.; GASPAROTTO, A. MOUTIN S. **A importância da qualidade na evolução do corte a plasma na indústria do metalmeccânica**. 2019. SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da FATEC, Taquaritinga, SP, 2019.
- SOARES, L. R.; NASCIMENTO, T. S.; GIMENES, L. **Comparação entre os processos de corte a plasma e oxibustível**. 2016. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo, SP, 2016.
- SUEDT, A. P.; LARIOS, M. R. B.; COSTA, F. P. S. **A importância de proteções em máquina de corte a plasma**. 2015. Praticando Uma Engenharia Mais Segura, p. 97. UNASP, Engenheiro Coelho, SP, 2015.

Resumo

A otimização de processos na gestão da produção e manutenção é um tema central para organizações que buscam melhorar sua eficiência operacional, reduzir custos e aumentar a competitividade no mercado. O objetivo geral deste artigo é identificar e analisar as principais estratégias de otimização de processos que podem ser implementadas na gestão da produção e manutenção esta pesquisa tratou-se de revisão da literatura com abordagem qualitativa e descritiva. A pesquisa dos estudos realizou-se nas seguintes bases de dados: *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Pubmed, Medline. Todo material encontrado foi analisado e selecionado conforme a temática discutida e ano de publicação de 2019 a 2023. A administração da produção e manutenção nas organizações brasileiras tem progredido de forma significativa nos últimos anos, impulsionada por demandas cada vez maiores de competitividade, inovação e eficácia operacional. A conclusão deste artigo reafirma a importância de estratégias eficazes de otimização de processos na gestão da produção e manutenção, com vistas à maximização da eficiência operacional e ao aumento da competitividade das empresas brasileiras.

Palavras-chave: Otimização de processos produtivos. Manutenção preditiva e preventiva. Indústria 4.0 e automação na gestão de manutenção.

Abstract

Process optimization in production and maintenance management is a central theme for organizations seeking to improve their operational efficiency, reduce costs, and increase competitiveness in the market. The general objective of this article is to identify and analyze the main process optimization strategies that can be implemented in production and maintenance management. This research was a literature review with a qualitative and descriptive approach. The research of the studies was carried out in the following databases: *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Pubmed, Medline. All material found was analyzed and selected according to the topic discussed and year of publication from 2019 to 2023. Production and maintenance management in Brazilian organizations has progressed significantly in recent years, driven by increasing demands for competitiveness, innovation, and operational efficiency. The conclusion of this article reaffirms the importance of effective process optimization strategies in production and maintenance management, with a view to maximizing operational efficiency and increasing the competitiveness of Brazilian companies.

Keywords: Optimization of production processes. Predictive and preventive maintenance. Industry 4.0 and automation in maintenance management.

1. INTRODUÇÃO

A otimização de processos na gestão da produção e manutenção é um tema central para organizações que buscam melhorar sua eficiência operacional, reduzir custos e aumentar a competitividade no mercado. Em um cenário de constantes mudanças tecnológicas e pressões econômicas, torna-se imprescindível que as empresas adotem estratégias eficazes para maximizar a produtividade e garantir a sustentabilidade de suas operações. A gestão da produção, responsável por transformar insumos em produtos finais, e a manutenção, que garante o funcionamento contínuo dos equipamentos e instalações, são áreas diretamente impactadas pela implementação de práticas otimizadas. Esse artigo busca explorar as principais estratégias de otimização de processos nessas áreas, evidenciando a importância da integração entre elas.

A justificativa para a realização deste estudo reside na crescente demanda das indústrias por soluções que possam não apenas aumentar a produção, mas também reduzir falhas operacionais e desperdícios. Muitas organizações enfrentam o desafio de alinhar sua capacidade produtiva com a necessidade de manutenção eficiente, o que muitas vezes resulta em interrupções não planejadas e custos elevados. A falta de sinergia entre as equipes de produção e manutenção pode levar a falhas no planejamento e execução de atividades, impactando diretamente os resultados organizacionais. Diante desse cenário, a pesquisa sobre estratégias de otimização de processos visa identificar soluções viáveis que possam contribuir para a melhoria contínua e a competitividade das empresas.

O problema de pesquisa que norteia este estudo se concentra em compreender como as organizações podem integrar de forma eficaz a gestão da produção e da manutenção, utilizando estratégias que promovam maior eficiência e redução de custos. A fragmentação entre esses setores é um dos grandes desafios enfrentados pelas empresas, o que demanda uma análise detalhada sobre as melhores práticas para unir essas duas áreas cruciais. Assim, a investigação busca responder: quais são as estratégias mais eficazes para otimizar os processos de produção e manutenção, de modo que trabalhem de maneira integrada e alinhada com os objetivos organizacionais?

O objetivo geral deste artigo é identificar e analisar as principais estratégias de otimização de processos que podem ser implementadas na gestão da produção e manutenção. Para alcançar esse propósito, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos: Compreender o atual panorama da gestão da produção e manutenção em empresas brasileiras, identificando pontos de melhoria e oportunidades de otimização de processos; Discorrer as principais estratégias e metodologias de otimização de processos aplicáveis à gestão da produção e manutenção, destacando suas vantagens, desafios e casos de sucesso em contextos empresariais brasileiros; destacar um conjunto de diretrizes e recomendações específicas para a implementação eficaz de estratégias de otimização de processos na gestão da produção e manutenção, considerando as características e necessidades das empresas brasileiras, com foco na maximização da eficiência operacional e competitividade no mercado.

Portanto, este artigo visa contribuir para o debate sobre a gestão eficiente da produção e manutenção, fornecendo insights relevantes para gestores e profissionais da área. Através da revisão de literatura e análise de exemplos práticos, espera-se oferecer uma visão abrangente sobre como a otimização desses processos pode impactar positivamente o desempenho organizacional. Ao final, espera-se que as conclusões apresentem direções claras para a implementação de melhorias, promovendo uma gestão mais integrada e



eficiente.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Esta pesquisa tratou-se de revisão da literatura com abordagem qualitativa e descritiva, onde permite a partir dessa técnica de coletar dados, sendo ela dividida em cinco etapas: na identificação do tema e seleção da hipótese; critérios para inclusão e exclusão de estudos; na definição das informações a serem extraídas dos estudos selecionados e categorização dos estudos; na avaliação dos estudos incluídos na revisão integrativa; na interpretação dos resultados e na apresentação da revisão e síntese do conhecimento.

A pesquisa dos estudos realizou-se nas seguintes bases de dados: *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), PUBMED, MEDLINE. Todo material encontrado foi analisado e selecionado conforme a temática discutida e ano de publicação de 2019 a 2023. Os critérios de inclusão foram artigos publicados na íntegra, no idioma português; disponibilidade do texto de forma integral, terem sido publicados no período de 2020 a 2024. Os critérios de exclusão serão artigos com publicação fora do recorte temporal de 2020 a 2024.

A coleta de dados realizar-se-á a partir de artigos publicados no período de julho e agosto de 2024, por meio dos descritores, com sua leitura prévia para a confecção dos objetivos e construção do artigo seguindo as normas e padrões da construção do estudo bibliográfico.

A análise de dados se deu por meio de leitura e interpretação dos dados encontrados nas respectivas publicações, na busca de responder os levantamentos propostos pela temática abordada.

2.2 Resultados e Discussão

A administração da produção e manutenção nas organizações brasileiras tem progredido de forma significativa nos últimos anos, impulsionada por demandas cada vez maiores de competitividade, inovação e eficácia operacional. No entanto, ainda há desafios consideráveis que dificultam a otimização completa dos processos de produção e manutenção. Este levantamento bibliográfico tem como objetivo analisar a situação atual dessas práticas no Brasil, destacando áreas de aprimoramento e oportunidades para aperfeiçoar os processos, com o intuito de elevar o padrão de excelência operacional das organizações (Baldisarelli; Fabro, 2019).

Segundo Carvalho (2019), a administração da produção compreende a programação, a estruturação, o comando e a supervisão das tarefas essenciais para converter matérias-primas em mercadorias prontas para venda. No cenário nacional, diversos pesquisadores indicam que a falta de comunicação entre setores e a carência de plataformas de dados confiáveis ainda são obstáculos frequentes para muitas organizações. Isso prejudica a eficácia das operações e eleva as despesas de funcionamento.

Por outro lado, o uso de práticas como Produção Enxuta e Controle de Qualidade têm sido cada vez mais comuns, especialmente em áreas industriais. Esses métodos têm sido empregados para diminuir desperdícios e melhorar a excelência dos produtos, levando a processos mais flexíveis e eficazes. Contudo, estudos apontam que a adoção dessas estratégias ainda é limitada em muitas pequenas e médias empresas, devido a restrições finan-

ceiras e à ausência de uma cultura organizacional focada na constante evolução (Carvalho, 2019).

A administração da conservação é essencial para assegurar a durabilidade e a disponibilidade de recursos produtivos. Nas organizações do Brasil, a mudança de uma manutenção corretiva para um enfoque preventivo e preditivo tem sido frequentemente discutida. A conservação corretiva, que é reativa por essência, ainda é predominante em diversos setores, ocasionando interrupções não programadas e custos de reparo elevados (Carvalho; Neves, 2019).

Estudos como o de Carvalho e Neves (2019), apontam que a adoção de tecnologias de previsão de manutenção, como o monitoramento por sensores e a utilização de grandes volumes de dados, têm a capacidade de revolucionar a situação atual. Esse tipo de manutenção prevê. O *Lean Manufacturing*, originado do sistema Toyota de produção, concentra-se na eliminação de desperdícios em todas as fases do processo produtivo, destacando a maximização do valor para o cliente.

No contexto brasileiro, sua aplicação tem sido vinculada a ganhos significativos em eficiência e à redução de custos, especialmente nas indústrias de manufatura. No entanto, a implementação do *Lean* enfrenta desafios relacionados à resistência cultural, a qual pode obstruir a mudança de mentalidade necessária para uma transformação organizacional sustentável. Apesar disso, empresas como a Embraer e a Natura alcançaram sucesso ao adotar princípios Lean, aprimorando seus processos produtivos e elevando seus padrões de competitividade global (Menezes, 2019).

Já o Seis Sigma, de acordo com Oliveira, Viana, Roberto e Sousa (2023) metodologia orientada à melhoria contínua com base em dados estatísticos, destaca-se por sua capacidade de reduzir variações e defeitos nos processos. No Brasil, grandes empresas, como a Ambev, têm empregado o Seis Sigma para aprimorar suas operações, atingindo altos níveis de qualidade e fomentando uma cultura de excelência operacional. Contudo, um dos desafios dessa metodologia é a necessidade de forte comprometimento da alta gestão e de um conhecimento técnico aprofundado por parte das equipes, o que pode limitar sua aplicação em pequenas e médias empresas.

A Manutenção Produtiva Total (MPT) é outra estratégia amplamente utilizada para a otimização de processos, com foco na manutenção preventiva e na participação ativa de todos os colaboradores. A TPM visa minimizar falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos, influenciando positivamente a produção e a manutenção. No entanto, sua aplicação em contextos empresariais brasileiros tem enfrentado desafios relacionados ao engajamento dos funcionários e à adaptação às realidades operacionais locais, embora empresas do setor automotivo, como a General Motors do Brasil, tenham alcançado resultados significativos na melhoria da confiabilidade de seus equipamentos (Piaia, 2019).

A automação industrial também se destaca como uma ferramenta poderosa de otimização de processos, especialmente em indústrias de grande porte. A integração de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IoT) e sistemas de controle avançado, possibilita a monitorização e o ajuste de processos em tempo real, elevando a eficiência e diminuindo a necessidade de intervenções manuais. No Brasil, empresas do setor petroquímico e de energia, como a Petrobras, têm implementado a automação para otimizar suas operações, embora o elevado custo de implementação e a necessidade de qualificação técnica representem barreiras significativas para uma adoção mais ampla (Santana, 2019).

Em síntese, de acordo com o estudo de Souza e Kester (2024) as principais estratégias e metodologias de otimização de processos aplicáveis à gestão da produção e manuten-



ção no Brasil têm gerado resultados notáveis em termos de eficiência e qualidade. Contudo, o êxito dessas abordagens depende não apenas da seleção da metodologia, mas também da competência das empresas em superar desafios culturais, financeiros e técnicos.

A experiência de grandes empresas brasileiras em casos de sucesso serve como referência para a adoção dessas práticas, sublinhando que a inovação contínua e a capacitação dos colaboradores são fundamentais para assegurar uma implementação eficaz e sustentável dessas estratégias (Teixeira; Lopes; Braga, 2021).

A implementação eficaz de estratégias de otimização de processos na gestão da produção e manutenção é essencial para maximizar a eficiência operacional e a competitividade das empresas brasileiras no mercado global. Este texto apresenta um conjunto de diretrizes específicas que considera o histórico do conceito de otimização, as diversas abordagens dos autores, uma análise comparativa e o estado atual do conhecimento sobre o tema, além de abordar os benefícios, riscos, vantagens e desvantagens das principais técnicas envolvidas (Teixeira; Lopes; Braga, 2021).

Para Baldisarelli e Fabro (2019), a otimização de processos na produção e manutenção não é um conceito novo, mas evoluiu significativamente nas últimas décadas com o avanço da tecnologia e das teorias de gestão. Nos anos 1950, com a ascensão da produção em massa e o sucesso do modelo de produção da Toyota, surgiram os primeiros estudos sobre eficiência produtiva, conduzidos por autores como Taiichi Ohno e Shigeo Shingo, que desenvolveram o conceito de *just-in-time* e o sistema Toyota de produção. Na mesma linha, a teoria da otimização ganhou destaque com a formulação dos princípios de produção enxuta (*Lean Manufacturing*), cuja base era eliminar desperdícios e maximizar o valor entregue ao cliente.

Autores como Hammer e Champy (1993), que introduziram o conceito de reengenharia de processos, sugeriram uma transformação radical dos processos de negócios para alcançar melhorias significativas em termos de custo, qualidade, serviço e velocidade. Eles argumentam que, em certos casos, melhorias incrementais são inadequadas, exigindo uma reavaliação fundamental dos processos produtivos (Carvalho, 2019).

Por outro lado, autores como Carvalho e Navas (2019), na abordagem do Lean thinking, sustentam que a otimização deve ser um processo contínuo, concentrando-se na melhoria contínua e incremental. Eles indicam que a utilização de ferramentas como o kaizen e o 5S é fundamental para otimizar a eficiência de maneira sustentável. Já na área de manutenção, o conceito de manutenção produtiva total (TPM), visa maximizar a eficiência dos equipamentos por meio de uma abordagem preventiva e proativa, engajando todos os níveis da organização (Carvalho; Navas, 2019).

A comparação entre as abordagens de Hammer e Champy (reengenharia de processos) e Womack e Jones (*Lean Manufacturing*) evidencia duas estratégias distintas de otimização. Enquanto a reengenharia se concentra em alterações disruptivas e de curto prazo, o Lean ressalta uma cultura de melhorias contínuas e sustentáveis (Oliveira, et al., 2023).

Embora a reengenharia possa proporcionar resultados rápidos, costuma ser arriscada e requer investimentos iniciais elevados, enquanto o Lean oferece uma abordagem menos dispendiosa e com menor risco a longo prazo. No campo da manutenção, a TPM se alinha com o *Lean* ao integrar a manutenção à produção, promovendo a autonomia dos operadores e a melhoria contínua. A TPM se destaca por prevenir falhas antes que elas ocorram, diferindo de modelos tradicionais de manutenção corretiva (Santana, 2019).

Para Souza e Kester (2024), as principais descobertas desses autores apontam para a necessidade de uma abordagem integrada entre produção e manutenção para maximizar

zar a eficiência operacional. Hammer e Champy sugerem que as empresas que passaram por reengenharia conseguiram reduções de até 70% em custos e aumentos significativos na qualidade e velocidade de entrega. Já Womack e Jones demonstraram que a aplicação dos princípios do Lean levou empresas a uma melhoria de até 90% no tempo de produção.

Na área de manutenção, Nakajima destacou que a implementação do TPM reduziu drasticamente o tempo de inatividade de equipamentos e melhorou a vida útil das máquinas, contribuindo para a competitividade industrial. Hoje, o conhecimento sobre otimização de processos evoluiu para uma visão mais holística e digitalizada (Teixeira; Lopes; Braga, 2021).

Com o advento da Indústria 4.0, novas tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data e Inteligência Artificial estão sendo integradas à produção e manutenção, permitindo uma maior previsibilidade e automação dos processos. O conceito de Manutenção Preditiva, por exemplo, utiliza sensores e dados em tempo real para prever falhas antes que elas ocorram, elevando os conceitos tradicionais de manutenção preventiva (Teixeira; Lopes; Braga, 2021).

Já sobre os benefícios da implementação de estratégias de otimização incluem aumento da produtividade, o estudo de Menezes, (2019), aponta que a redução de custos operacionais, melhoria da qualidade dos produtos e aumento da satisfação dos clientes. No entanto, há riscos envolvidos, como a resistência à mudança por parte dos funcionários, a necessidade de altos investimentos iniciais e o risco de interrupção das operações durante o processo de implementação.

A principal vantagem das abordagens de Lean e TPM é sua ênfase em uma cultura de melhoria contínua e na participação ativa de todos os níveis da organização. Em comparação com a Reengenharia, essas abordagens são menos arriscadas e oferecem resultados consistentes a longo prazo. Por outro lado, a Reengenharia, embora arriscada, pode ser mais eficaz em cenários onde mudanças rápidas e profundas são necessárias para garantir a sobrevivência da empresa MENEZES, (2019).

Ainda para Menezes (2019), considerando as características e necessidades das empresas brasileiras, as seguintes diretrizes são propostas para a implementação eficaz de estratégias de otimização:

1. Avaliação Diagnóstica: Realizar uma análise detalhada dos processos atuais, identificando pontos críticos e gargalos que afetam a eficiência;
2. Definição de Metas: Estabelecer metas claras e mensuráveis, alinhadas com a estratégia de negócios da empresa;
3. Escolha da Abordagem: Decidir entre uma abordagem de melhoria contínua (Lean, TPM) ou uma transformação radical (Reengenharia), dependendo do contexto da empresa;
4. Treinamento e Capacitação: Investir no treinamento dos funcionários, promovendo uma cultura de participação e melhoria contínua;
5. Integração Tecnológica: Aproveitar as tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e Big Data, para otimizar a manutenção e a produção;
6. Monitoramento e Ajustes: Implementar indicadores de desempenho para monitorar os resultados e ajustar as estratégias conforme necessário.

A implementação dessas diretrizes poderá garantir às empresas brasileiras não apenas maior eficiência, mas também maior competitividade no cenário global.



Observou-se que a gestão da produção e manutenção nas empresas brasileiras enfrenta um cenário dinâmico e desafiador, onde a busca pela otimização de processos é essencial para garantir competitividade e eficiência operacional. Em um mercado cada vez mais globalizado e pressionado por inovações tecnológicas, as organizações têm investido em estratégias que aprimoram a gestão produtiva e a manutenção de seus ativos, visando reduzir custos, aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos e serviços (Menezes, 2019).

As estratégias de otimização de processos na gestão da produção e manutenção têm ganhado destaque no cenário industrial brasileiro, impulsionadas pela necessidade de aumento da competitividade e eficiência operacional. No Brasil, as empresas enfrentam desafios relacionados a altos custos de produção, falhas de equipamentos e a crescente demanda por inovação. Nesse contexto, a adoção de tecnologias avançadas e metodologias de gestão se torna essencial para garantir a sustentabilidade e o crescimento no mercado global (Carvalho, 2019).

Além disso, ainda para Carvalho (2019), as estratégias como o *Lean Manufacturing* e o Six Sigma têm sido adotadas para eliminar desperdícios, melhorar a qualidade dos processos e aumentar a eficiência produtiva. A implementação dessas metodologias busca otimizar o uso de recursos, reduzir o tempo de produção e melhorar a qualidade final do produto.

O cenário atual no Brasil, apesar dos avanços, ainda enfrenta desafios como a resistência à mudança, a falta de qualificação técnica e o alto custo inicial de implementação de tecnologias de ponta. Contudo, há uma tendência crescente de investimento em capacitação profissional e em automação industrial, visando à melhoria contínua e à otimização de processos produtivos (Carvalho, 2019).

A perspectiva para o futuro é promissora, com uma previsão de aumento na adoção de tecnologias de manutenção baseada em dados e sistemas integrados de produção. A digitalização da indústria brasileira deverá ser intensificada, permitindo maior controle e eficiência nos processos. Além disso, espera-se que as empresas busquem cada vez mais integrar sustentabilidade às suas operações, utilizando recursos de forma mais consciente e promovendo a economia circular (Carvalho, 2019).

Portanto, as estratégias de otimização de processos na gestão da produção e manutenção continuarão sendo essenciais para que o Brasil se posicione de maneira competitiva no cenário global, maximizando o uso de tecnologias emergentes e adotando práticas mais sustentáveis e eficientes.

3. CONCLUSÃO

A conclusão deste artigo reafirma a importância de estratégias eficazes de otimização de processos na gestão da produção e manutenção, com vistas à maximização da eficiência operacional e ao aumento da competitividade das empresas brasileiras. Ao longo do estudo, foram identificadas oportunidades significativas de melhoria nos processos empresariais, especialmente em áreas que envolvem planejamento, execução e monitoramento de atividades de produção e manutenção.

As estratégias e metodologias analisadas, como Lean Manufacturing, Six Sigma e Manutenção Produtiva Total (TPM), demonstraram ser ferramentas poderosas para alcançar ganhos em eficiência, redução de desperdícios e maior controle dos processos produtivos. Embora cada uma dessas metodologias apresente seus desafios e particularidades na im-

plementação, os casos de sucesso em empresas brasileiras evidenciam seu potencial de adaptação e eficácia.

Além disso, o desenvolvimento de diretrizes específicas para a implementação dessas estratégias reforça a necessidade de considerar o contexto particular das empresas brasileiras, como recursos disponíveis, cultura organizacional e barreiras estruturais. Nesse sentido, as recomendações fornecidas visam orientar as organizações no direcionamento de suas ações, promovendo a sustentabilidade dos resultados alcançados e fortalecendo sua posição competitiva no mercado.

Portanto, a adoção consciente e bem planejada de estratégias de otimização de processos constitui uma via promissora para a modernização da gestão da produção e manutenção, sendo essencial para que as empresas brasileiras se mantenham competitivas e preparadas para os desafios de um mercado cada vez mais dinâmico e exigente.

REFERÊNCIAS

- BALDISARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção Preditiva na Indústria 4.0. **Revista Scientia Cum Industria**, Caxias do Sul, v. 07, n. 2., p. 12-22, 2019.
- CARVALHO, Maria Ana dos Santos. Proposta de Modelo para a Melhoria Contínua das Atividades de Gestão da Manutenção. **Revista Mecânica**, 2019.
- CARVALHO, Maria; NAVAS, Helena V. G. Proposta de um Modelo para a Implementação da Filosofia Lean na Gestão da Manutenção. In: **8º Encontro Nacional de Engenharia e Gestão Industrial**, 2019.
- MENEZES, Afonso Henrique Novaes et al. Metodologia científica: teoria e aplicação na educação a distância. Petrolina-PE: **Universidade Federal do Vale do São Francisco**, 2019.
- OLIVEIRA, André Souza de; VIANA, Bruno Carvalho; ROBERTO, José Carlos Alves; SOUTO, Sístina Pereira. Aplicação da metodologia *lean manufacturing* à gestão da manutenção industrial. **Revista GeSec, São Paulo**, v. 14, n. 6, p. 8997-9018, 2023.
- PIAIA, Maria Luiza. Modelo de avaliação da maturidade da implementação do Lean Manufacturing com utilização de uma abordagem multicritério linguístico, **Revista Scientia Cum Industria**, 2019.
- SANTANA, Otacílio Antunes. O Trabalho Científico na Metodologia Científica. 1. ed. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, **Departamento de Engenharia Florestal**, 2019.
- SOUZA, Maísa Castro de; KESTER, Leandro Valkinir. Planejamento e controle de manutenção: um estudo de caso – **Malinski. Engenharia**, v. 28, ed. 136, jul. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/planejamento-e-controle-de-manutencao-um-estudo-de-caso-malinski/>. Acesso em: 10 set. 2024.
- TEIXEIRA, H. N.; LOPES, I.; BRAGA, A. C. Implementação da Manutenção Baseada em Condição: uma Revisão de Literatura. In: Conferência Internacional Sobre Automação Flexível E Manufatura Inteligente, 2021. **Science Direct Procedia Manufacturing**, n. 51, p. 228-235.



Resumo

Este artigo aborda o potencial que o Torneamento Assistido por Ultrassom (TAU) apresenta como uma técnica inovadora para otimização do processo de usinagem de materiais difíceis de usar. O problema estudado refere-se à dificuldade enfrentada por métodos convencionais de usinagem na manipulação de materiais de alta dureza e geometria complexa, que frequentemente resultam em acabamentos insatisfatórios e desgaste elevado das ferramentas. O objetivo geral foi investigar como o TAU pode melhorar esses aspectos, promovendo uma remoção de material mais eficiente e um acabamento superior. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente que analisou diversas pesquisas relacionadas ao TAU, comparando seus resultados com os métodos tradicionais. Os principais achados indicam que o TAU melhora a eficiência da usinagem, reduzindo a força de corte e o desgaste das ferramentas e também proporciona uma qualidade final do produto significativamente superior. As considerações finais ressaltam a importância da continuidade das pesquisas nesta área, especialmente no que tange à padronização dos métodos de TAU e à exploração de novas aplicações em diferentes materiais. O estudo conclui que o TAU representa uma direção promissora para inovações no setor de usinagem, com implicações práticas relevantes para a indústria.

Palavras-chave: Torneamento, Usinagem Assistida por Ultrassom, Vantagens do Ultrassom na Usinagem.

Abstract

This paper addresses the potential of Ultrasonic-Assisted Turning (UAT) as an innovative technique for optimizing the machining process of difficult-to-machine materials. The problem studied pertains to the challenges faced by conventional machining methods when working with high-hardness and complex-geometry materials, which often lead to unsatisfactory surface finishes and significant tool wear. The main objective was to investigate how UAT could improve these aspects by promoting more efficient material removal and superior surface quality. To this end, a comprehensive literature review was conducted, analyzing various studies related to UAT and comparing their findings with traditional methods. Key findings indicate that UAT enhances machining efficiency by reducing cutting forces and tool wear, while also providing a significantly higher product surface quality. The concluding remarks emphasize the importance of continued research in this field, particularly regarding the standardization of UAT methods and the exploration of new applications for different materials. The study concludes that UAT represents a promising direction for innovations in the machining sector, with significant practical implications for the industry.

Keywords: Turning, Ultrasonic-Assisted Machining, Advantages of Ultrasonics in Machining.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem assistida por ultrassom (ASU) representa uma técnica inovadora na indústria de manufatura, oferecendo novas perspectivas para o aprimoramento dos processos de produção. Esta técnica envolve a aplicação de vibrações ultrassônicas durante o processo de corte e tem despertado interesse devido às suas vantagens potenciais em termos de eficiência, precisão e qualidade das peças produzidas. No torneamento a precisão é fundamental e a integração do ultrassom promete melhorar os resultados, impactando positivamente diversas áreas industriais. Este estudo se propôs-se a realizar uma investigação abrangente sobre os diversos aspectos relacionados à ASU aplicada ao torneamento. A pesquisa se concentrou em explorar os conceitos fundamentais por trás dessa técnica, suas aplicações práticas e os benefícios associados à sua implementação. Ao entender-se mais profundamente as dinâmicas envolvidas no processo de usinagem assistida por ultrassom, esperou-se contribuir para o avanço do conhecimento nesse campo e para a otimização dos processos industriais.

A análise das possíveis aplicações industriais do TAU foi um dos focos primordiais deste estudo. Ao examinar exemplos de utilização em diversos segmentos industriais, foi viável identificar áreas específicas onde essa abordagem pode se mostrar mais vantajosa, assim como as restrições que podem surgir em contextos particulares. Além disso, foram examinados os ganhos tangíveis e intangíveis que a usinagem auxiliada por ultrassom pode proporcionar, tais como aprimoramentos na qualidade das peças, prolongamento da vida útil das ferramentas e redução do tempo de fabricação. Todas as análises propostas foram estritamente desenvolvidas sob métodos de revisão de literatura.

O TAU tem atraído interesse devido às suas vantagens em precisão, qualidade das peças usinadas e eficiência operacional. Esta técnica se apresenta como uma solução promissora para desafios industriais, como a demanda por peças de alta qualidade em prazos reduzidos e a necessidade de aumentar a vida útil das ferramentas de corte. Assim, investigar esse tema é essencial para ampliar o conhecimento sobre suas aplicações, limitações e benefícios potenciais. A pesquisa sobre TAU é relevante para a indústria e a academia, pois ao entender melhor seus princípios e implicações práticas, os resultados podem ajudar a desenvolver estratégias mais eficazes de usinagem, resultando em processos mais eficientes e econômicos. Além disso, ao fornecer informações sobre suas aplicações e impactos, o estudo pode orientar decisões em empresas e instituições de pesquisa, promovendo inovação e avanço tecnológico no setor de manufatura.

As contribuições deste estudo também se estendem além do âmbito industrial, trazendo benefícios sociais e acadêmicos significativos. Ao promover uma melhor compreensão das técnicas de ASU, este estudo pode inspirar o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e ecologicamente conscientes na indústria. Além disso, ao disseminar conhecimentos e promover o debate acadêmico sobre este tema, a pesquisa pode estimular o crescimento da comunidade científica e incentivar futuras investigações interdisciplinares no campo da engenharia de materiais e processos de fabricação.

Diante da crescente relevância da ASU no contexto industrial, surge a necessidade de investigar suas aplicações específicas na operação de torneamento. Considerando-se potenciais benefícios dessa técnica, o seguinte questionamento surgiu: como a implementação do TAU pode impactar operações de usinagem em termos de qualidade, custos de produção e eficiência?

O principal objetivo desta revisão bibliográfica consistiu em investigar técnicas e re-

sultados relacionados ao uso do ultrassom como ferramenta auxiliar na operação de torneamento, visando ampliar o conhecimento sobre suas aplicações e benefícios na indústria de manufatura. Os objetivos específicos incluíram: descrever as principais técnicas e métodos empregados na ASU, com ênfase no torneamento; abordar as vantagens da ASU como alternativa às limitações dos processos convencionais, especialmente na usinagem de materiais de alta dureza e geometrias complexas; e, por fim, investigar o potencial do TAU, enfatizando a avaliação de seus impactos sobre a peça, conforme evidências da literatura científica sobre os benefícios diretos e indiretos de seu uso.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia empregada neste estudo foi a de revisão bibliográfica, que se caracterizou pela análise crítica e sistemática da literatura disponível sobre o tema em discussão. Foram consultados livros, dissertações, teses e artigos científicos seletos por meio de buscas em bases de dados acadêmicas reconhecidas, como o Portal de Periódicos da CAPES, *Web of Science*, Scopus, SciELO, ScienceDirect, Google Acadêmico. O período dos estudos pesquisados foi restrito predominantemente aos últimos dez anos (2014 a 2024), assegurando o alcance de resultados atuais e relevantes, entretanto, algumas obras foram desse período foram incluídas por serem essenciais para o tema, isto é, 10% da amostra de obras. Quanto ao idioma original das obras sintetizadas, 97% foram disponibilizadas na língua inglesa e 3% na língua portuguesa. As palavras-chave utilizadas na busca foram selecionadas com base nos conceitos centrais do TAU, incluindo “Usinagem Assistida por Ultrassom”, “Torneamento” e “Vantagens do Ultrassom na Usinagem”. A pesquisa foi conduzida de maneira sistemática e abrangente, considerando-se uma variedade de fontes para garantir uma análise completa e imparcial do tema. A seleção de obras priorizou com rigor trabalhos de alta qualidade, credibilidade e relevância para o estudo. Analisou-se criticamente e com clareza as informações alcançadas foram analisadas, visando oferecer uma visão abrangente das aplicações, conceitos e benefícios do TAU.

2.2 Resultados e Discussão

De acordo com Chen *et al.* (2018), no processo de torneamento ultrassônico, também conhecido como TAU, são aplicadas vibrações de alta frequência e baixa amplitude à ferramenta de usinagem, com o intuito de aprimorar a retirada de material, modificando os parâmetros do corte e otimizando os resultados da operação. Xu e Zhang (2015) destacam que a usinagem ultrassônica tem proporcionado avanços notáveis no desempenho dos processos de corte de diversos materiais. Os pesquisadores Xu, Zhang e Wu (2014) explicam que a corrente elétrica de alta frequência é convertida em vibrações mecânicas por um transdutor piezoelétrico ou dispositivo magnetostriativo, sendo o sonotrodo (formado por *booster* e *horn*) responsável por (conduzir as ondas acústicas e amplificar o movimento ultrassônico), gerando vibrações harmônicas ao longo da direção da vibração em frequências altas (geralmente entre 20 e 40 kHz) e com amplitude reduzida, geralmente entre 1 e 15 μm . A Figura 1 ilustra a interação entre a peça em processo, o dispositivo de corte e os dispositivos utilizados na técnica TAU.

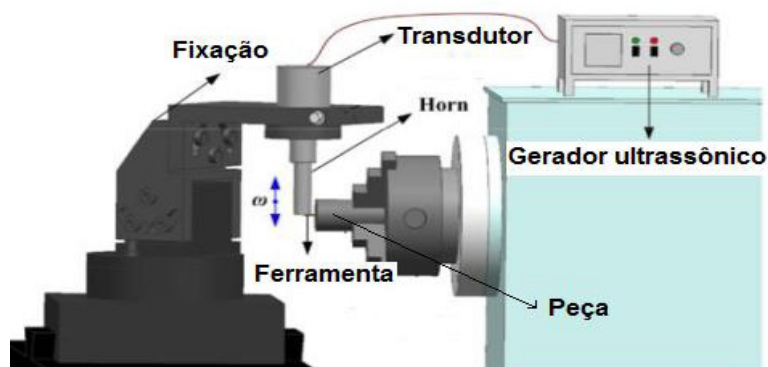


Figura 1. Fases do torneamento assistido por técnica de ultrassom

Fonte: Gonçalves Júnior (2019, p. 53)

Chen *et al.* (2018) e Xu e Zhang (2015) classificam a técnica de TAU segundo as direções em que a vibração é emitida, assim, os caminhos operacionais que o dispositivo de corte desenvolve sob vibrações controladas se dá como um parâmetro de classificação desse método em 1D e 2D, sendo essas as classes principais. Durante o corte unidimensional, a ferramenta oscila ao longo da direção da profundidade de corte (Vibração Direcional Normal - VDN) ou na direção do corte (Vibração Direcional de Corte - VDC). Já no corte 2D ou bidirecional, a ferramenta vibra simultaneamente nas direções e sentido de corte e profundidade (Vibração Assistida Elíptica – VAE), formando uma trajetória elíptica. A Figura 2 reserva-se indicar o trajeto do dispositivo de corte na interface peça/ferramenta durante execução da técnica de TAU. Embora haja essas classificações, não há uma regra específica que as normatize, pois diversos modelos propostos pelos autores aplicam vibração em diferentes direções (corte, translado e profundidade), tanto no corte 1D quanto no 2D e, mais recentemente, no 3D (torneamento por vibração tridimensional – 3DVT), conforme demonstrado na pesquisa de Hosseinabadi, Sajjady e Amini (2018) para criar micro superfícies texturizada.

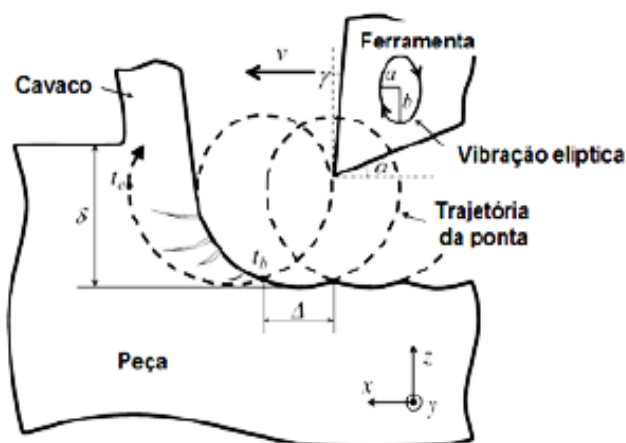


Figura 2. Representação do trajeto elíptico do dispositivo de corte na técnica VAE

Fonte: Adaptado de Gonçalves Júnior (2019, p. 50)

O tema da usinagem ultrassônica, especialmente no contexto do torneamento, sempre despertou interesse, especialmente entre autores mais recentes, devido ao potencial de suas aplicações. Brehl e Dow (2008) foram fundamentais nesse âmbito, ao afirmarem que os sistemas de usinagem em duas dimensões são frequentemente utilizados em aplicações de ultra precisão, com profundidades de corte variando de 1 μm a 50 μm . Por outro lado, os sistemas unidimensionais tendem a ser aplicados em processos de usinagem

de precisão e em métodos tradicionais, onde as profundidades de corte são significativamente maiores em comparação com a maioria dos sistemas 2D. No método de usinagem ultrassônica, conhecido como TAU, a precisão é uma característica marcante, e seu funcionamento é descrito por um ciclo de vibração que envolve quatro etapas distintas. Na primeira etapa, a ferramenta se aproxima do material. A segunda etapa envolve o contato inicial da ferramenta com o material, que inicia a formação do cavaco. Na terceira etapa, a ferramenta está totalmente engajada com o cavaco e avança, atingindo a profundidade máxima de corte, semelhante ao torneamento convencional, onde a ferramenta mantém contato constante com o cavaco. Finalmente, na quarta etapa, a ferramenta inverte sua direção, afastando-se da peça e diminuindo a pressão exercida sobre o material. A Figura 3 ilustra essas etapas de forma clara.

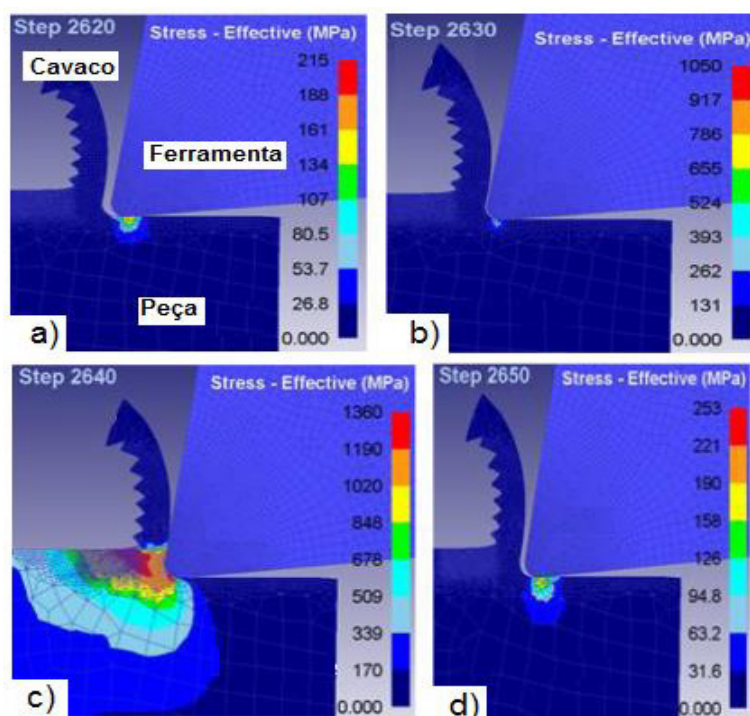


Figura 3. Fases do torneamento assistido por técnica de ultrassom

Fonte: Adaptado a partir de Patil *et al.* (2014)

Atualmente, a indústria observa um aumento na necessidade de componentes que apresentem precisão elevada em vários setores, como eletro-ótica, aeroespacial, engenharia biomédica e sistemas microeletromecânicos. Esses componentes, que demandam tolerâncias extremamente rigorosas e acabamentos de altíssima qualidade, são fundamentais em aplicações que utilizam materiais duros e frágeis, como vidros ópticos e cerâmicas avançadas, devido às suas notáveis propriedades físicas, mecânicas, ópticas e eletrônicas (Gonçalves Júnior, 2019). Contudo, a grande dureza e a baixa tenacidade à fratura desses materiais geram desafios na usinagem, como o desgaste excessivo das ferramentas e danos durante o processo. Além disso, a presença de geometrias complexas em alguns componentes torna ainda mais difícil a realização de usinagem de alta precisão (Sharma; Pandey, 2016; Chen *et al.*, 2018).

Segundo Yang *et al.* (2020), materiais metálicos de alta resistência, como ligas de titânio, superligas de níquel e aços de alta resistência, apresentam propriedades superiores e destacam-se pelo seu desempenho em diversas aplicações, incluindo os setores aeroespacial, de aviação, automotivo, entre outros, o que tem despertado grande interesse científico. Embora apresentem vantagens muito apreciadas, Chen *et al.* (2021a) destacam

que esses materiais têm baixa usinabilidade e custos elevados de usinagem, dificultando seu uso devido à alta resistência, baixa condutividade térmica e características particulares na formação de cavacos. Os estudos de Wang *et al.* (2022) e Tang *et al.* (2022) somam algumas desvantagens inevitáveis do uso de métodos convencionais de usinagem, como a geração de forças e temperatura de corte significativas, desgaste acelerado da ferramenta e danos superficiais que prejudicam o acabamento da peça usinada.

A técnica de corte assistido por vibração ultrassônica tem ganhado destaque como uma solução inovadora para usinar materiais conhecidos pela dificuldade no corte (Niu *et al.*, 2019). Frente aos problemas mencionados, o TAU também se sobressai comparando-a às técnicas de usinagem a *laser* e à descarga elétrica, pois, é conhecido sobre essas que são muito caras e energeticamente desvantajosas (Sajjady *et al.*, 2016). A usinagem ultrassônica tem sido aplicada no processamento de materiais duros e frágeis em diversos processos como TAU, fresamento e retificação assistida por ultrassom e furação assistida por vibração. Os benefícios observados incluem a melhoria na geometria, que se torna extremamente bem defendida, e na textura da superfície, resultando em textura muito mais otimizada, além da diminuição da deterioração da ferramenta e do aumento da sua vida útil (Gonçalves Júnior, 2019).

Chen *et al.* (2021b) descrevem que a força de corte é um parâmetro muito importante, estreitamente ligado à maneira como o cavaco se forma, e, por isso, serve como um excelente indicador para prever o desempenho do corte. Esse parâmetro pode servir como uma ferramenta valiosa para prever e avaliar o desempenho do corte, ajudando a otimizar o processo e melhorar a qualidade do acabamento. O corte assistido por vibração ultrassônica tem o potencial de diminuir significativamente a força de corte e reduzir suas variações, o que contribui para uma melhoria expressiva no desempenho do processo. Essa redução da força de corte ocorre principalmente devido ao corte intermitente, que é uma característica desse método e ajuda a tornar a usinagem mais eficiente e precisa (Zarchi; Razfar; Abdullah, 2012). Lotfi *et al.* (2016) também notaram que a aplicação de vibração ultrassônica, mesmo com uma quantidade mínima de lubrificação, reduziu as forças de corte durante a furação do AISI 1045.

A usinagem assistida por vibração de baixa frequência pode aprimorar a usinabilidade de materiais desafiadores, mesmo naqueles em que o corte intermitente não ocorre naturalmente. Essa técnica facilita o processo, tornando a usinagem mais eficaz e ampliando o leque de materiais que podem ser trabalhados com eficiência (Maurotto; Wickramarachchi, 2016). O auxílio ultrassônico no torneamento apresenta diversos resultados relatados na literatura.

No trabalho de Zou *et al.* (2017), foi empregado um aço inoxidável amplamente utilizado na fabricação de moldes complexos e precisos para conduzir experimentos com o método TAU. Os pesquisadores notaram que o TAU resultou em uma diminuição considerável da força de atrito entre a ferramenta e a peça, alcançando até 84%. Essa redução possibilitou um processo de corte mais fluido e eficiente. Os resultados indicaram que, em relação ao torneamento tradicional, a aplicação da vibração ultrassônica melhorou significativamente o desempenho do corte, aumentando a durabilidade da ferramenta e elevando a qualidade geral do processo. Patil *et al.* (2014) também relataram uma melhoria notável na qualidade da superfície ao usinar ligas de titânio utilizando o método TAU. Com uma velocidade de corte de 20 m/min, o processo conseguiu melhorar o acabamento da superfície em 40%. De acordo com os autores, o TAU gerou superfícies consideravelmente mais lisas e de melhor qualidade do que aquelas obtidas com técnicas de usinagem convencionais.

Patil *et al.* (2014) também puderam verificar que a presença de vibração ultrassônica

na usinagem de Ti6Al4V contribuiu para a redução da formação de bandas de cisalhamento e da força de corte. Arefin *et al.* (2021) concluíram que, em comparação com o corte convencional, o corte intermitente com recuperação elástica e endurecimento por deformação aumentou o ângulo de cisalhamento, diminuindo a espessura do cavaco e o comprimento de contato entre a ferramenta e o cavaco no processo de corte com assistência de ultrassom. Eles observaram que esse menor comprimento de contato se deve ao endurecimento por deformação, o que contribui para uma menor deformação secundária. Lotfi *et al.* (2020) sugeriram que o atrito entre a ferramenta e o cavaco diminuiu devido à redução da força de corte no torneamento elíptico 3-D assistido por vibração ultrassônica de Ti6Al4V.

Gao, Sun e Leopold (2015) realizaram uma comparação entre o torneamento tradicional e a técnica TAU ao usinar uma barra cilíndrica de AISI 1045, com ênfase na textura da superfície. Após a usinagem, foi empregada uma análise de rugosidade utilizando um perfilômetro eletrônico para verificar os resultados obtidos. Os pesquisadores notaram que a superfície tratada com o método TAU apresentava uma uniformidade significativamente superior em comparação ao método convencional, mesmo quando submetida às mesmas condições de corte, o que indicou uma melhoria considerável na estabilidade do processo de usinagem. A Figura 4 ilustra esses resultados comparativos de rugosidade entre as superfícies usinadas com e sem a utilização da vibração.

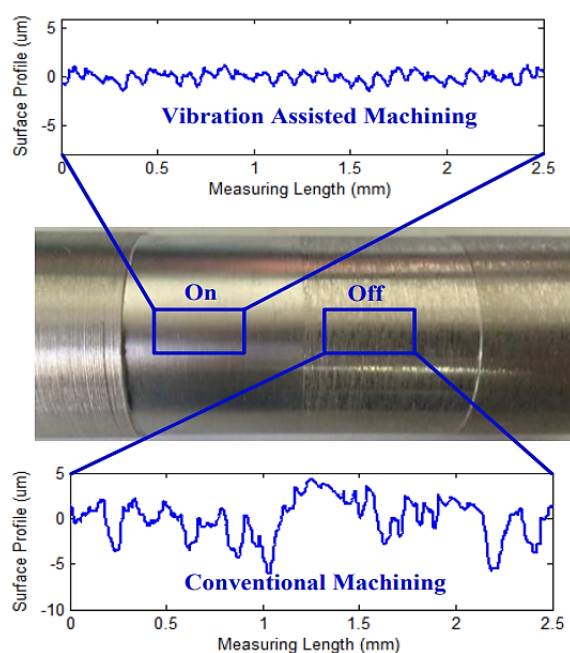


Figura 4. Comparação entre acabamentos superficiais obtidos por torneamento convencional e TAU de um aço inoxidável do tipo AISI 1045

Fonte: Gao, Sun e Leopold (2015, p. 520)

Liu *et al.* (2019) introduziram uma técnica inovadora chamada torneamento assistido por vibração ultrassônica radial (TVUR). Nesse método, a vibração ultrassônica é aplicada na direção da profundidade de corte, com o objetivo de criar uma textura superficial na peça usinada. Durante o processo de TVUR, a vibração da ferramenta altera a trajetória do corte, resultando na formação de micro-ondulações na superfície. É essencial ressaltar que, nesse método, a amplitude da vibração ultrassônica é rigorosamente controlada para que não exceda a profundidade de corte, garantindo um contato constante entre a ferramenta e a superfície da peça ao longo de todo o procedimento.

No trabalho de Xu, Zhang e Wu (2014), foi investigado o método TAU na usinagem de

compósitos de polímero reforçado com fibra, utilizando uma ferramenta de metal duro. Os achados indicaram que a vibração aplicada durante o processo teve um efeito benéfico, resultando em uma redução significativa das forças de corte e minimizando os danos na subsuperfície do material. Além disso, essa técnica favoreceu uma melhoria na qualidade da superfície final e aumentou a durabilidade da ferramenta, destacando-se como uma alternativa mais eficaz para a usinagem desse tipo de material.

Gao e Jin (2019) observaram que diversos estudos constataram que o aumento de temperatura é reduzido durante o corte de metais assistido por vibração ultrassônica. Kurniawan, Kumaran e Ko (2021) identificaram que o uso da vibração elíptica ultrassônica no corte de AISI 1045 reduz a força de corte e aumenta a concentração de tensão e o pico de temperatura na ferramenta. Em outra perspectiva quanto à temperatura, Doan, Fang e Chen (2021) observaram temperaturas mais elevadas no corte por vibração elíptica de ligas de alta entropia. Segundo avaliações de Chen *et al.* (2021c), a temperatura na zona primária de cisalhamento não se mantém constante e apresenta variações durante o processo de segmentação de cavacos, o que resulta em deformações mais complexas e características transitórias na usinagem de metais.

Embora a vibração ultrassônica tenha trazido benefícios ao processo de usinagem, e embora atualmente a literatura é ainda mais repleta de vantagens quanto o auxílio ultrassônico, Kumabe *et al.* (1989) já constataavam uma limitação de velocidade ao aplicar essa técnica em condições práticas. Considerando-se isso, um entendimento mais aprofundado sobre a redução da força de corte pode impulsionar o uso da vibração ultrassônica e permitir avanços em relação às limitações de velocidade no corte, diversos estudos têm explorado os processos físicos que levam a essa diminuição da força de corte com a aplicação de vibração ultrassônica nos últimos anos (Chen *et al.*, 2022).

Os autores apresentados colaboram plenamente para fornecer uma visão abrangente sobre o potencial da ASU frente aos métodos tradicionais, com destaque para o TAU e suas aplicações em diferentes materiais. Os resultados mais significativos deste estudo são discutidos adiante.

A literatura revisada sobre o TAU revela resultados que respondem diretamente ao problema de pesquisa, focado em como essa técnica pode otimizar a usinagem de materiais difíceis. Estudos como os de Chen *et al.* (2018) e Xu e Zhang (2015) mostram que vibrações ultrassônicas alteram a mecânica de corte, proporcionando remoção mais eficiente de material e acabamentos superiores, alinhados ao objetivo de comparar o TAU aos métodos convencionais.

O TAU apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais, como redução da força de corte e menor deterioração da ferramenta, conforme evidenciado por Gao, Sun e Leopold (2015) e Patil *et al.* (2014). Esse benefício leva a custos operacionais mais baixos e maior vida útil das ferramentas, atendendo à demanda por soluções econômicas para a usinagem de materiais desafiadores.

A aplicação do TAU em materiais difíceis, como ligas de titânio e cerâmicas avançadas, é destacada por Niu *et al.* (2019) e Yang *et al.* (2020). A melhoria na textura da superfície e a redução da força de atrito, observadas por Zou *et al.* (2017), são valiosas em setores como o aeroespacial e biomédico, que requerem alta qualidade e precisão.

Avanços tecnológicos na usinagem, como o uso de vibrações em 1D, 2D e 3D, descritos por Chen *et al.* (2018) e Hosseinabadi *et al.* (2018), trazem flexibilidade ao TAU, permitindo superfícies texturizadas e geometrias complexas. Isso está em linha com o objetivo de explorar novas metodologias para potencializar a usinagem.

Quanto aos custos de produção, a literatura sugere que o TAU reduz os custos operacionais a longo prazo. A maior vida útil das ferramentas, conforme Patil *et al.* (2014) e Xu, Zhang e Wu (2014), implica menos trocas e menor tempo de inatividade, contribuindo para a eficiência e a redução de custos.

A revisão bibliográfica também aponta para a necessidade de padronização dos métodos de TAU, segundo Gonçalves Júnior (2019), sugerindo futuras pesquisas para criação de normas aplicáveis na indústria, ampliando aplicações e superando desafios identificados. Em síntese, a revisão bibliográfica evidencia o TAU como uma técnica promissora, capaz de revolucionar a usinagem de materiais complexos. Os resultados atendem aos objetivos da pesquisa e oferecem contribuições práticas para a indústria, destacando o TAU pela eficiência, redução de custos e qualidade aprimorada nos produtos finais.

3. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo principal investigar o potencial do TAU na otimização do processo de usinagem de materiais difíceis. Ao longo do trabalho, foram analisadas diversas fontes que evidenciaram a eficácia do TAU em comparação com os métodos convencionais, além de suas aplicações em diferentes materiais e a melhoria da qualidade final dos produtos. Com base nos resultados discutidos, pode-se concluir que o objetivo foi amplamente alcançado, uma vez que a técnica demonstrou não apenas otimizar a eficiência do processo de usinagem, mas também proporcionar acabamentos superiores.

A resposta ao problema de pesquisa se fundamenta na constatação de que o TAU apresenta vantagens significativas, especialmente na usinagem de materiais de alta dureza e geometria complexa, onde os métodos tradicionais frequentemente falham. A introdução de vibrações ultrassônicas não apenas melhora a remoção de material, mas também reduz a força de corte e o desgaste das ferramentas, o que, conseqüentemente, resulta em uma maior durabilidade das mesmas. Esses aspectos são essenciais para a viabilidade econômica do processo, destacando a relevância do TAU na indústria moderna.

Entretanto, a pesquisa também revelou algumas limitações. A necessidade de padronização nos métodos de TAU, conforme discutido ao longo do trabalho, é um ponto crucial que ainda precisa ser abordado. A falta de normas aplicáveis pode dificultar a adoção generalizada da técnica na indústria. Além disso, a variedade de materiais e configurações de ferramentas que podem ser testadas ainda apresenta um vasto campo a ser explorado. Essas limitações ressaltam a importância de continuar a investigação neste domínio, visando aprimorar as práticas existentes e expandir o conhecimento sobre o TAU.

Como recomendações para estudos futuros, sugere-se a realização de pesquisas que busquem estabelecer normas e padrões para a aplicação do TAU, bem como a exploração de novos materiais que possam ser trabalhados utilizando essa técnica. Além disso, investigações mais profundas sobre a interação entre as vibrações ultrassônicas e as características dos materiais podem proporcionar insights valiosos, permitindo a otimização de processos em setores específicos, como o aeroespacial e biomédico.

Em suma, a revisão realizada demonstrou que o TAU é uma abordagem inovadora que pode transformar a usinagem de materiais difíceis, oferecendo soluções práticas para os desafios enfrentados na indústria. Com o suporte de pesquisas futuras, é possível expandir as aplicações dessa técnica, contribuindo para um avanço significativo no campo da usinagem e produção industrial.



REFERÊNCIAS

- AREFIN, Shamsul. *et al.* Study of chip formation mechanism in one-dimensional vibration-assisted machining. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 291, p. 117022, 2021.
- BREHL, D. E.; DOW, T. A. Review of vibration-assisted machining. **Precision Engineering**, v. 32, n. 3, p. 153–172, 2008.
- CHEN, Xuelin. *et al.* A new geometric model of serrated chip formation in high-speed machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 62, p. 632–645, 2021a.
- CHEN, Xuelin. *et al.* An accurate transient model for temperature fluctuation on localized shear band in serrated chip formation. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 204, p. 106588, 2021b.
- CHEN, Xuelin. *et al.* An Analytical and Experimental Study on Cutting Characteristics and Transient Cutting Force Modeling in Feed Directional Ultrasonic Vibration-Assisted Cutting of High Strength Alloys. **Materials**, v. 15, n. 20, p. 7388, 2022.
- CHEN, Xuelin. *et al.* Experimental study on the evolution of chip morphology, chip formation, and surface topography with cutting parameters, and their relationships in dry milling of cast aluminum alloy with PCD inserter. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 35, p. 1651–1662, 2021c.
- CHEN, Wanqun. *et al.* State-of-the-art review on vibration-assisted milling: principle, system design, and application. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 97, p. 2033–2049, 2018.
- DOAN, Dinh-Quan; FANG, Te-Hua; CHEN, Tao-Hsing. Machining mechanism and deformation behavior of high-entropy alloy under elliptical vibration cutting. **Intermetallics**, v. 131, p. 107079, 2021.
- GAO, Jian; JIN, Xiaoliang. Effects of Ultrasonic Vibration Assistance on Chip Formation Mechanism in Cutting of Ti–6Al–4V. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 141, n. 12, p. 121007, 2019.
- GAO, Yuan; SUN, Ronglei; LEOPOLD, Jürgen. Analysis of cutting stability in vibration assisted machining using an analytical predictive force model. **Procedia CIRP**, v. 31, p. 515–520, 2015.
- GONÇALVES JÚNIOR, Marcos. **Torneamento assistido por ultrassom de materiais cerâmicos em verde e pré-sinterizados**. 2019. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.
- HOSSEINABADI, H. N.; SAJJADY, S. A.; AMINI, S. Creating micro textured surfaces for the improvement of surface wettability through ultrasonic vibration assisted turning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 2825–2839, 2018.
- KUMABE, J. *et al.* Ultrasonic superposition vibration cutting of ceramics. **Precision Engineering**, v. 11, n. 2, p. 71–77, 1989.
- KURNIAWAN, Rendi; KUMARAN, S. Thirumalai; KO, Tae Jo. Finite element analysis in ultrasonic elliptical vibration cutting (UEVC) during micro-grooving in AISI 1045. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 22, p. 1497–1515, 2021.
- LIU, X. *et al.* Analysis of surface texturing in radial ultrasonic vibration-assisted turning. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 267, n. September 2018, p. 186–195, 2019.
- LOTFI, Mohammad *et al.* Built-up edge reduction in drilling of AISI 1045 steel. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 6, p. 623–630, 2017.
- PATIL, S. *et al.* Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V. **Ultrasonics**, v. 54, n. 2, p. 694–705, 2014.
- MAUROTTO, A.; WICKRAMARACHCHI, C. T. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: a feasibility study. **Ultrasonics**, v. 65, p. 113–120, 2016.
- NIU, Ying. *et al.* Investigation of cutting force in longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling of Ti-6Al-4V. **Materials**, v. 12, n. 12, p. 1955, 2019.
- SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Recent advances in ultrasonic assisted turning: A step towards sustainability. **Cogent Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–20, 2016.
- SAJJADY, S. A. *et al.* Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning. **JMADE**, v. 93, p. 311–323, 2016.

- TANG, Zhongwei. *et al.* An innovative geometric error compensation of the multi-axis CNC machine tools with non-rotary cutters to the accurate worm grinding of spur face gears. **Mechanism and Machine Theory**, v. 169, p. 104664, 2022.
- XU, W. X.; ZHANG, L. C. Ultrasonic vibration-assisted machining: principle, design and application. **Advances in Manufacturing**, v. 3, n. 3, p. 173–192, 2015.
- XU, W.; ZHANG, L. C.; WU, Y. Elliptic vibration-assisted cutting of fibre-reinforced polymer composites: Understanding the material removal mechanisms. **Composites Science and Technology**, v. 92, p. 103–111, 2014.
- YANG, Zhichao. *et al.* Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 156, p. 103594, 2020.
- WANG, Shenghui. *et al.* Digital tooth contact analysis of face gear drives with an accurate measurement model of face gear tooth surface inspected by CMMs. **Mechanism and Machine Theory**, v. 167, p. 104498, 2022.
- ZARCHI, M. M. A.; RAZFAR, M. R.; ABDULLAH, Amir. Investigation of the effect of cutting speed and vibration amplitude on cutting forces in ultrasonic-assisted milling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 226, n. 7, p. 1185–1191, 2012.
- ZOU, Lai. *et al.* Investigation on diamond tool wear in ultrasonic vibration-assisted turning die steels. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 32, n. 13, p. 1505–1511, 2017.

Engenharia Química





MODERN INDUSTRIAL SOLID WASTE MANAGEMENT PRACTICES: A BIBLIOGRAPHICAL REVIEW WITH EMPHASIS ON SUSTAINABILITY AND EFFICIENCY IN SECTOR

Joeberson Castro Baldez

43

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia das práticas de gestão de resíduos sólidos industriais na promoção da sustentabilidade ambiental no setor industrial. O estudo foi motivado pela crescente necessidade de compreender como essas práticas impactam a eficiência e a sustentabilidade das operações industriais. A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica qualitativa, utilizando bases de dados como SciELO e Google Acadêmico, com artigos publicados entre 2014 e 2024. Foram selecionados estudos que abordassem as práticas de gestão de resíduos, métodos de disposição e tratamento, além das regulamentações pertinentes ao tema. Os resultados revelaram que, embora existam avanços significativos na implementação de práticas sustentáveis, ainda há barreiras, especialmente em pequenas e médias empresas, devido a altos custos e falta de infraestrutura. O trabalho concluiu que as práticas de gestão de resíduos sólidos têm potencial para promover a sustentabilidade, mas requerem melhorias contínuas e maior integração entre políticas públicas e o setor privado. Recomenda-se que futuras pesquisas explorem metodologias inovadoras e busquem soluções para as limitações identificadas.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Gestão de resíduos. Eficiência industrial. Política ambiental. Indústria.

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of industrial solid waste management practices in promoting environmental sustainability in the industrial sector. The study was motivated by the growing need to understand how these practices impact the efficiency and sustainability of industrial operations. The research was conducted through a qualitative literature review, using databases such as SciELO and Google Scholar, with articles published between 2014 and 2024. Studies that addressed waste management practices, disposal and treatment methods, and regulations relevant to the topic were selected. The results revealed that, although there are significant advances in the implementation of sustainable practices, there are still barriers, especially in small and medium-sized companies, due to high costs and lack of infrastructure. The study concluded that solid waste management practices have the potential to promote sustainability, but require continuous improvements and greater integration between public policies and the private sector. It is recommended that future research explore innovative methodologies and seek solutions to the identified limitations.

Keywords: Sustainability. Waste management. Industrial efficiency. Environmental policy. Industry.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos industriais é uma questão de crescente relevância no cenário global, especialmente com o aumento das atividades produtivas e suas consequentes implicações ambientais. A produção industrial, que impulsiona o desenvolvimento econômico, também gera uma significativa quantidade de resíduos, os quais, se não forem geridos adequadamente, podem causar sérios danos ao meio ambiente e à saúde pública (Soares; Araújo, 2016).

Sobrinho *et al.* (2020) destacam que nos últimos anos, diversos países têm adotado políticas rigorosas e tecnologias avançadas para minimizar os impactos causados pelos resíduos sólidos industriais. No entanto, ainda existem desafios consideráveis, especialmente em regiões onde a infraestrutura é precária ou as regulamentações não são devidamente aplicadas. A adoção de práticas modernas de gestão, como a reciclagem de resíduos plásticos, apresenta-se como uma solução eficaz para reduzir os impactos ambientais e melhorar a eficiência operacional das indústrias de pequeno e médio porte do setor plástico.

Este estudo justifica-se pela necessidade de compreender melhor como a gestão de resíduos sólidos industriais, especialmente plásticos, influencia tanto a sustentabilidade ambiental quanto a eficiência das operações. Muitas dessas indústrias ainda enfrentam barreiras na adoção de tecnologias mais limpas e na conformidade com regulamentações ambientais, tornando crucial a investigação sobre como essas práticas podem ser aprimoradas.

A questão central do estudo é como a reciclagem de resíduos plásticos no setor industrial impacta a sustentabilidade e a eficiência das operações. A pesquisa busca entender se as práticas atualmente adotadas são suficientes para equilibrar a produção industrial com a preservação ambiental ou se ainda existem lacunas que precisam ser preenchidas. O objetivo geral é avaliar a eficácia da reciclagem de resíduos plásticos na promoção da sustentabilidade ambiental nas indústrias de pequeno e médio porte.

Para isso, são propostos objetivos específicos, como descrever os conceitos fundamentais de gestão de resíduos plásticos industriais, compreender os métodos de reciclagem e tratamento utilizados globalmente e demonstrar os pontos positivos e negativos das diferentes estratégias de reciclagem. Este trabalho, portanto, dedica-se a analisar como a reciclagem de resíduos plásticos pode contribuir para um setor industrial mais responsável e eficiente, promovendo o crescimento econômico, a preservação dos recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida das populações impactadas por essas atividades.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo e descritivo; A pesquisa foi conduzida exclusivamente por meio de levantamento de publicações científicas. Os artigos consultados foram publicados no período entre 2014 e 2024, buscando abranger o que há de mais recente na área. Os critérios de inclusão utilizados foram: artigos escritos em português e inglês, disponíveis integralmente, que tratavam especificamente de práticas de gestão de resíduos sólidos industriais, sustentabilidade, e eficiência industrial.



Foram considerados também artigos que abordassem a implementação de políticas públicas e regulamentações relacionadas ao tema. Critérios de exclusão foram aplicados para desconsiderar resumos, primeiras impressões, artigos de revisão ou qualquer material que não apresentasse dados e análises originais sobre o tema proposto.

A busca foi realizada em bases de dados amplamente reconhecidas na área acadêmica, como Google Acadêmico, SciELO e a Plataforma de Periódicos CAPES, além de consultas a bancos de teses e dissertações. Para a pesquisa, foram utilizadas palavras-chave como “gestão de resíduos sólidos industriais”, “sustentabilidade industrial”, “eficiência ambiental”, “práticas modernas de gestão de resíduos”, e “impacto ambiental da gestão de resíduos”. Esses descritores foram fundamentais para garantir que os materiais selecionados estivessem diretamente relacionados ao tema central do estudo.

Com esse método de busca e seleção, foi possível reunir uma ampla base teórica, que permitiu a análise crítica das práticas de gestão de resíduos sólidos industriais ao redor do mundo, sempre levando em consideração a literatura mais atualizada sobre o tema.

2.2 Resultados e Discussão

A gestão de resíduos sólidos industriais tem se tornado uma preocupação crescente na busca pela sustentabilidade ambiental, especialmente no setor industrial. O adequado gerenciamento dos resíduos sólidos industriais pode minimizar os impactos ambientais, melhorar a qualidade de vida e promover o bem-estar social. A falta de um aterro sanitário adequado prejudica a destinação correta dos resíduos, mostrando que a eficiência na gestão desses materiais ainda é um desafio significativo (Soares; Araújo, 2016).

Além disso, Stumpf, Theis e Schreiber (2018) destacam que a gestão de resíduos em indústrias metalomecânicas de pequeno porte enfrenta obstáculos semelhantes, especialmente no que diz respeito à conscientização das empresas sobre sua responsabilidade ambiental. As empresas que aplicam estratégias de reaproveitamento de materiais, como a reciclagem de resíduos, conseguem não apenas reduzir os custos operacionais, mas também contribuir para a sustentabilidade ambiental. Esses esforços, porém, exigem investimentos em novas tecnologias e uma mudança na cultura organizacional.

Torres (2016) aponta que a fragilidade das políticas públicas e a ausência de interação entre as esferas governamentais também agravam a problemática da gestão de resíduos. No caso do município de Cascavel-CE, a gestão inadequada dos resíduos sólidos urbanos e industriais reflete a falta de controle social e ambiental, prejudicando a eficiência das práticas de gestão e intensificando a degradação ambiental. Essa situação ressalta a necessidade de uma gestão integrada e eficaz para promover a sustentabilidade e evitar danos ao meio ambiente.

Por outro lado, Fagundes (2015) afirma que a utilização de metodologias avançadas, como a modelagem *fuzzy*, pode ser uma solução para otimizar a gestão de resíduos sólidos industriais. Esse tipo de tecnologia permite uma avaliação mais precisa do desempenho ambiental, proporcionando uma gestão mais eficiente dos resíduos e promovendo a sustentabilidade no setor industrial. A adoção de tais práticas é essencial para garantir que as empresas atendam às exigências legais e ambientais, ao mesmo tempo em que otimizam seus processos produtivos.

A gestão de resíduos sólidos industriais também enfrenta desafios relacionados às regulamentações e políticas que orientam o setor. As diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil são um marco importante para impulsionar

práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos. No entanto, a implementação dessas políticas nas pequenas e médias empresas industriais ainda é limitada, muitas vezes devido à falta de recursos e conhecimento técnico para adaptar-se às exigências legais. Esse cenário compromete tanto a eficiência quanto a sustentabilidade no setor (Fagundes; Silva; Mello, 2015).

Por sua vez, Oliveira (2018) destaca que as práticas de gestão de resíduos industriais são influenciadas pela capacidade das empresas de incorporar métodos modernos de tratamento e disposição. Empresas de maior porte, com maior capital, tendem a adotar tecnologias mais avançadas, como sistemas de reaproveitamento e reciclagem. Essas práticas não apenas reduzem o volume de resíduos destinados a aterros, mas também geram oportunidades de inovação e ganhos econômicos. Entretanto, em muitas indústrias, a resistência à mudança e os custos iniciais de implementação ainda são barreiras significativas para a adoção dessas tecnologias.

Sob uma perspectiva mais ampla, Sobrinho *et al.* (2020) reforçam que a globalização e o aumento da competitividade industrial têm incentivado empresas em todo o mundo a buscar soluções mais eficientes para a gestão de resíduos. Países como Alemanha e Japão têm adotado políticas rigorosas de reciclagem e reuso de materiais, elevando os padrões de sustentabilidade. Essas iniciativas servem como modelos para o Brasil, onde ainda se observa uma necessidade de maior articulação entre as empresas e o governo para o desenvolvimento de uma cultura de gestão de resíduos alinhada aos princípios da sustentabilidade.

Além disso, a adoção de práticas sustentáveis de gestão de resíduos pode proporcionar às indústrias uma vantagem competitiva, além de promover a responsabilidade social corporativa. As empresas que investem em práticas sustentáveis tendem a melhorar sua imagem perante o mercado e a sociedade, atraindo consumidores que valorizam o compromisso ambiental. No entanto, isso exige uma integração eficaz entre as políticas ambientais e a gestão interna das empresas, garantindo que os benefícios econômicos e ambientais sejam alcançados de forma equilibrada (Mello; Sehnem, 2016).

Além dos aspectos mencionados, é importante destacar que as práticas de gestão de resíduos sólidos também devem estar alinhadas com uma visão estratégica de longo prazo. Conforme apontado por Soares e Araújo (2016), empresas que adotam uma abordagem mais proativa na gestão de resíduos conseguem reduzir seus impactos ambientais e, ao mesmo tempo, obter ganhos econômicos por meio da reutilização de materiais. Essas empresas, ao planejarem suas atividades com foco na sustentabilidade, se tornam mais resilientes diante de pressões regulatórias e de mercado.

Torres (2016), ao tratar da gestão de resíduos em municípios, aponta que a ausência de uma infraestrutura adequada para o tratamento e disposição final dos resíduos gera fragilidades tanto ambientais quanto sociais. No contexto industrial, essa situação pode ser agravada quando as empresas não têm acesso a tecnologias modernas ou não seguem as regulamentações ambientais, resultando em práticas de gestão inadequadas que comprometem tanto a sustentabilidade quanto a saúde pública. Dessa forma, a colaboração entre o setor público e privado se torna essencial para a implementação de soluções eficazes.

No mesmo sentido, Fagundes (2015) sugere que a avaliação de desempenho ambiental por meio de metodologias como a modelagem *fuzzy* pode ser uma ferramenta eficaz para medir o impacto das práticas de gestão de resíduos sólidos nas indústrias. Essa abordagem permite uma análise mais precisa dos dados e auxilia na tomada de decisões que promovam a sustentabilidade. A adoção de indicadores de desempenho ambiental é fun-



damental para que as empresas possam monitorar e ajustar continuamente suas práticas, garantindo que estas estejam em conformidade com as metas de sustentabilidade.

A utilização de novas tecnologias, conforme destacado por Oliveira (2018), também é crucial para otimizar a gestão de resíduos. O autor ressalta que, apesar dos avanços tecnológicos disponíveis, muitas empresas ainda encontram dificuldades para implementar essas soluções devido aos altos custos iniciais. No entanto, Oliveira argumenta que, a longo prazo, os benefícios econômicos e ambientais superam esses custos, tornando o investimento em tecnologias de gestão de resíduos um fator essencial para o sucesso industrial.

Além disso, Mello e Sehnem (2016) apontam que as empresas que conseguem integrar a gestão de resíduos sólidos a uma visão de responsabilidade social corporativa têm maiores chances de alcançar um desenvolvimento sustentável. Ao adotar práticas que visam à redução de resíduos e ao mesmo tempo beneficiar a comunidade, essas empresas fortalecem sua posição no mercado e ganham credibilidade entre seus stakeholders. Essa abordagem integrada pode ser vista como um diferencial competitivo, especialmente em setores onde a sustentabilidade é um fator decisivo para o sucesso.

Ao comparar os resultados obtidos por Soares e Araújo (2016) e Stumpf, Theis e Schreiber (2018), percebe-se que ambos destacam a importância de uma gestão eficiente de resíduos sólidos para a sustentabilidade industrial. No entanto, enquanto Soares e Araújo (2016) enfatizam o impacto econômico positivo da reutilização de resíduos no setor calçadista, Stumpf, Theis e Schreiber (2018) exploram a eficiência ambiental em pequenas indústrias metalomecânicas, ressaltando a necessidade de maior conscientização e adaptação tecnológica.

Torres (2016) e Fagundes (2015) trazem perspectivas complementares sobre os desafios de implementação de práticas modernas de gestão de resíduos sólidos. Torres (2016) foca nas dificuldades enfrentadas pela administração pública e sua relação com a gestão de resíduos industriais, enquanto Fagundes (2015) apresenta a modelagem *fuzzy* como uma ferramenta eficiente para avaliar o desempenho ambiental. Ambos ressaltam que, sem um controle eficaz e uma avaliação constante, os resultados das políticas de gestão podem ser limitados.

Ao discutir os resultados do setor industrial em termos de sustentabilidade, Sobrinho et al. (2020) e Oliveira (2018) concordam que as práticas de gestão de resíduos estão avançando globalmente, mas apontam diferenças regionais e estruturais. Sobrinho et al. (2020) destacam o papel das políticas internacionais e de empresas multinacionais, enquanto Oliveira (2018) enfatiza a necessidade de as empresas brasileiras investirem em tecnologias mais avançadas para alcançar padrões globais de sustentabilidade.

Mello e Sehnem (2016) e Fagundes, Silva e Mello (2015) compartilham uma visão sobre a importância de integrar a sustentabilidade nas estratégias empresariais. Mello e Sehnem (2016) ressaltam que as empresas que promovem a responsabilidade social ganham vantagem competitiva, enquanto Fagundes, Silva e Mello (2015) destacam a necessidade de alinhamento com políticas públicas como a PNRS para garantir uma gestão eficaz e sustentável dos resíduos sólidos.

Na continuidade da análise, nota-se que Soares e Araújo (2016) e Fagundes (2015) concordam em relação à importância de monitoramento contínuo na gestão de resíduos sólidos. Ambos defendem que as indústrias precisam de avaliações constantes para adequar suas práticas e garantir resultados positivos tanto para o meio ambiente quanto para a própria operação industrial. Contudo, Fagundes (2015) aprofunda essa questão ao sugerir a modelagem *fuzzy* como uma técnica inovadora, enquanto Soares e Araújo (2016) focam em estratégias mais tradicionais de redução de resíduos.

Stumpf, Theis e Schreiber (2018), ao compararem sua pesquisa com a de Torres (2016), mostram que, enquanto as pequenas indústrias enfrentam barreiras financeiras e técnicas para implementar práticas sustentáveis, o setor público, como no caso de Cascavel-CE, também encontra dificuldades na coordenação e implementação de políticas de gestão de resíduos. Ambos concordam que sem uma infraestrutura e suporte adequados, tanto o setor público quanto privado enfrentam desafios semelhantes na promoção da sustentabilidade.

Sobrinho *et al.* (2020) e Oliveira (2018) compartilham uma visão de que a globalização e as pressões internacionais estão moldando as práticas de gestão de resíduos em muitos países, incluindo o Brasil. No entanto, enquanto Sobrinho *et al.* (2020) apontam que a adaptação a essas pressões pode beneficiar o país no longo prazo, Oliveira (2018) ressalta que, no cenário atual, muitas empresas brasileiras ainda não estão preparadas para enfrentar esses desafios devido aos altos custos de tecnologias avançadas.

Por fim, Mello e Sehnem (2016) e Fagundes, Silva e Mello (2015) focam na importância da conformidade regulatória. Ambos os estudos destacam que o cumprimento das diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) não apenas atende a exigências legais, mas também contribui para o fortalecimento da imagem das empresas. No entanto, Fagundes, Silva e Mello (2015) enfatizam o papel crucial do Estado em oferecer suporte técnico e financeiro para facilitar a implementação dessas práticas, enquanto Mello e Sehnem (2016) focam mais nos benefícios de mercado que as empresas podem obter ao se alinharem com essas normas.

3. CONCLUSÃO

Com o encerramento deste trabalho, foi possível obter um estudo reflexivo sobre a eficácia das práticas de gestão de resíduos sólidos industriais e sua capacidade de promover a sustentabilidade ambiental no setor industrial. O problema proposto foi respondido ao se constatar que as práticas modernas de gestão de resíduos impactam positivamente a sustentabilidade e a eficiência industrial, desde que sejam implementadas de forma adequada e respaldadas por políticas públicas eficazes. O objetivo geral foi alcançado, na medida em que foram avaliadas diferentes abordagens e metodologias de gerenciamento de resíduos, destacando tanto seus pontos positivos quanto as limitações enfrentadas pelas empresas na adoção dessas práticas.

Em relação aos objetivos específicos, os conceitos fundamentais de gestão de resíduos sólidos industriais foram definidos com clareza, abrangendo os tipos de resíduos, métodos de disposição e tratamento, bem como as regulamentações pertinentes. Além disso, os principais métodos de gestão de resíduos sólidos utilizados ao redor do mundo foram identificados, permitindo a compreensão das melhores práticas que podem ser adotadas pelas indústrias brasileiras. A avaliação das vantagens e desvantagens das estratégias de gerenciamento estudadas também foi realizada, demonstrando que, embora muitas empresas tenham obtido sucesso na adoção de práticas sustentáveis, ainda existem desafios relacionados aos altos custos de implementação e à falta de infraestrutura adequada.

Apesar do cumprimento dos objetivos propostos, o estudo apresentou algumas limitações, principalmente em relação à disponibilidade de dados mais detalhados sobre a implementação de tecnologias avançadas em pequenas e médias empresas. Recomenda-se que estudos futuros explorem mais a fundo a integração entre políticas públicas e a realidade operacional dessas indústrias, buscando soluções viáveis para superar as barreiras financeiras e técnicas. Além disso, futuras pesquisas podem se concentrar em meto-



dologias inovadoras de avaliação de desempenho ambiental, como forma de aprimorar a eficiência e a sustentabilidade no setor industrial.

REFERÊNCIAS

FAGUNDES, Alexandre Borges. **Modelagem Fuzzy para Avaliação de Desempenho Ambiental do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Industriais**. 2015. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Curitiba, 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/150137845.pdf>. Acesso em: 11 set. 2024.

FAGUNDES, Alexandre Borges; SILVA, Maclovio Corrêa da; MELLO, Renato de. A gestão dos resíduos industriais em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos: uma contribuição para as Micro e Pequenas Empresas. **Espacios**, v. 36, n. 9, p. 6, 2015. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a15v36n01/15360106.html>. Acesso em: 02 set. 2024.

MELLO, Thilly Hanna Cardoso de; SEHNEM, Simone. Gestão de Resíduos Sólidos: um estudo de caso na CETRIC (Central de Tratamento de Resíduos Sólidos Industriais) de Chapecó-SC. **Revista Gestão & Planejamento**, Salvador, v. 17, n. 3, p. 432-447, 2016. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rgb/article/view/3537/3036>. Acesso em: 15 set. 2024.

OLIVEIRA, Edenis Cesar de. Gestão de Resíduos Sólidos Industriais: Estudo de Caso na Multinacional LDCB – Unidade do Interior do Estado de São Paulo. **ANAP Brasil – Revista Científica**, v. 11, n. 22, 2018. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/anap_brasil/article/download/1855/1767/3788. Acesso em: 12 set. 2024.

SOARES, Eliseu Affonso; ARAÚJO, Geraldino Carneiro de. Gestão de resíduos sólidos no processo produtivo: um estudo de caso em uma indústria calçadista. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 14, n. 2, p. 171-181, ago./dez. 2016. Disponível em: http://periodicos.unincor.br/index.php/revistaunincor/article/view/2622/pdf_520. Acesso em: 03 set. 2024.

SOBRINHO, Paulo Emílio Alves Miranda et al. Gestão de resíduos sólidos no Polo Industrial de Manaus, Amazônia, Brasil. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 212-234, 2020. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2233>. Acesso em: 07 set. 2024.

TORRES, Clerijane Nascimento. A gestão dos resíduos sólidos no município de Cascavel-CE: fragilidade ambiental, social e política. **Geosaberes**, Fortaleza, v. 6, número especial (3), p. 84-97, fev. 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5528/552856412009.pdf>. Acesso em: 09 set. 2024.

STUMPF, Uliça Dutra; THEIS, Vanessa; SCHREIBER, Dusan. Gestão de Resíduos Sólidos em Empresas Metalmeccânicas de Pequeno Porte. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 230-247, maio/ago. 2018. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6787119>. Acesso em: 10 set. 2024.

Este livro reúne uma seleção de Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) desenvolvidos por alunos dos cursos de Engenharia Mecânica, Ambiental, Elétrica, de Controle e Automação, de Produção e Química da Faculdade Anhanguera de São Luís. As pesquisas abordam temas atuais e relevantes, alinhados aos desafios da Indústria 4.0, como automação, sustentabilidade, IoT, eficiência energética e gestão de processos. Com base em rigor acadêmico e espírito inovador, os capítulos evidenciam a capacidade dos futuros engenheiros em propor soluções práticas e criativas para o setor produtivo. Uma leitura essencial para quem busca entender o papel estratégico da engenharia na transformação do Brasil.

