



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO - UFMT
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

DIEGO FERREIRA LEITE DA SILVA

MAPEAMENTO DE TECNOLOGIAS APLICADAS EM MOTORES ELÉTRICOS NO
CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Várzea Grande
2023

DIEGO FERREIRA LEITE DA SILVA

**MAPEAMENTO DE TECNOLOGIAS APLICADAS EM MOTORES ELÉTRICOS
NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
FAENG – Faculdade de Engenharia, como pré-
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Mestre Aline Flávia Nonato da
Costa Moro

Várzea Grande
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S586m Silva, Diego Ferreira Leite da.

Mapeamento de Tecnologias Aplicadas em Motores Elétricos no Contexto da Indústria 4.0 [recurso eletrônico] / Diego Ferreira Leite da Silva. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 54 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientadora: Aline Flávia Nonato da Costa Moro.

TCC (graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Engenharia, Várzea Grande, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

1. Motores elétricos. 2. Indústria 4.0. 3. Eficiência Energética. 4. Internet das Coisas (IoT). 5. Digital Twin e Robôs Autônomos.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.041453/2023-98

Interessado: ALINE FLAVIA NONATO DA COSTA, BRUNO SILVA MARCIO, VINICIUS DE CILLO

MORO

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Mapeamento de Tecnologias Aplicadas em Motores Elétricos no Contexto da Indústria 4.0

ALUNO(A): DIEGO FERREIRA LEITE DA SILVA

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Mato Grosso (FAENG/CUVG/UFMT), como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovada em 02/06/2023.

Nota: **5,0**

Esta monografia foi julgada adequada, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Profª. Ma. Aline Flávia Nonato da Costa Moro

Orientador(a)

Prof. Dr. Bruno Silva Marció

Examinador

Prof. Me. Vinicius de Cillo Moro

Examinador



Documento assinado eletronicamente por **ALINE FLAVIA NONATO DA COSTA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 12:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **BRUNO SILVA MARCIO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 13:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **VINICIUS DE CILLO MORO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 05/06/2023, às 18:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5849604** e o código CRC **488B753C**.

Dedico este trabalho a minha avó Tereza da Silva, meu pai Avelino da Silva, todos meus familiares e ao meus queridos tios Aurelino da Silva e Luis Bartolo da Silva (in Memoria), pelo incentivo e apoio e por não medirem esforços para me ajudar durante toda essa jornada. Sem eles não seria possível a realização do meu sonho e principalmente a Deus.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo dessa caminhada na realização do meu sonho.

Agradeço ao meu Pai Avelino da Silva, minha avó Tereza da Silva, minha irmã Alessandra, aos meus primos Hiago e Lays, aos meus familiares (primos, tios, sobrinhos) por todo apoio e incentivo nos momentos difíceis ao longo da minha vida acadêmica e pessoal.

Aos meus sogros Nelson e Silvana, seu Natalino pelo apoio e incentivo e especialmente minha namorada Maria Antonielly pela paciência e companheirismo durante essa jornada.

Agradeço ao meu tio Luiz Bartolo e Álvaro Rodrigues pelos ensinamentos na parte civil, elétrica e entre outros, que contribuíram pelo meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo da minha vida.

A minha orientadora Aline Flávia Nonato pelos ensinamentos, dedicação e competência durante esse período e principalmente pela valiosa contribuição para meu crescimento profissional. Agradeço também a todos os professores do curso de Engenharia de Controle e Automação pela dedicação aos alunos.

Aos meus amigos que fiz ao longo desses cinco anos de faculdade Daniel Cortez, Eduardo Camargo, Fernanda Quadros, Gabriel Carneiro, Guilherme, Nadyne Churé pelo companheirismo e pela contribuição para meu crescimento profissional e pessoal. Principalmente a Eduardo, Fernanda e Nadyne pelos momentos difíceis, sofridos e alegres vividos durante a faculdade.

Ao curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Mato Grosso, pela excelente estrutura e suporte ao longo desses cinco anos.

Ao finalizar esse curso, gostaria de agradecer a todos aqueles que, de alguma maneira contribuíram para minha formação acadêmica na graduação.

*“Não temas, porque eu sou contigo; não te assombres, porque eu sou teu Deus; eu te esforço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça.”
(Isaías 41:10)*

RESUMO

Da Silva, D. F. L. **Mapeamento de Tecnologias Aplicadas em Motores Elétricos no Contexto da Indústria 4.0**. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia e Controle e Automação, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil, 2023.

O trabalho proposto centrou-se no mapeamento de novas tecnologias aplicadas em motores elétricos conceituando a Indústria 4.0. Com base nisso, o trabalho foi dividido em cinco capítulos para apresentar desde a história das quatro revoluções industriais até o mapeamento de tecnologias aplicáveis a motores elétricos. Com o objetivo de compreender a importância dessas novas tecnologias aplicadas na indústria, são apresentados os principais tipos de motores elétricos e suas classificações, e os conceitos e perspectivas para a Indústria 4.0, fazendo uma breve apresentação dos nove pilares da quarta revolução industrial. A metodologia utilizada teve como base uma revisão bibliográfica a partir da escolha de três dos nove pilares da Indústria 4.0: IoT, Digital *Twin* e Robôs Autônomos. Com base nessas três tecnologias, foi possível realizar um levantamento de aplicações desenvolvidas com o objetivo de aumentar o desempenho dos motores elétricos no setor industrial e concluindo que a indústria 4.0 possibilitará uma evolução do meio industrial na forma que conhecemos hoje, tornando-o mais seguro, eficiente e rentável.

Palavras-chave: Motores Elétricos; Indústria 4.0; Eficiência Energética; Internet da Coisas (IoT); Digital Twin e Robôs Autônomos.

ABSTRACT

Da Silva, D. F. L. **Mapping of Technologies Applied in Electric Motors in the Context of Industry 4.0**. 54 p. Undergraduate Dissertation – Control and Automation Engineering, Engineering Faculty, Federal University of Mato Grosso, Brazil, 2023.

The proposed work focused on mapping new technologies applied in electric motors conceptualizing Industry 4.0. Based on this, the work was divided into five chapters to present from the history of the four industrial revolutions to the mapping of technologies applicable to electric motors. In order to understand the importance of these new technologies applied in industry, the main types of electric motors and their classifications are presented, as well as the concepts and perspectives for Industry 4.0, making a brief presentation of the nine pillars of the fourth industrial revolution. The methodology used was based on a bibliographic review based on the choice of three of the nine pillars of Industry 4.0: IoT, Digital Twin and Autonomous Robots. Based on these three technologies, it was possible to carry out a survey of applications developed with the objective of increasing the performance of electric motors in the industrial sector. Based on this study, it was possible to conclude that Industry 4.0 will enable an evolution of the industrial environment in the way we know it today, making it safer, more efficient and profitable.

Keywords: Electric Motors; Industry 4.0; Energy Efficiency; Internet of Things (IoT); Digital Twin and Autonomous Robots.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Werner Siemens testando seu gerador de CC.	14
Figura 2 - Classificação motor CA.	16
Figura 3 - Classificação motor CC.	16
Figura 4 – Motor elétrico trifásico.	18
Figura 5 – Motor CC e suas partes.	19
Figura 6 – Pilares da Indústria 4.0.	20
Figura 7 – Interação pela IoT.	22
Figura 8 - Chão de fábrica eficiente utiliza a tecnologia <i>Digital Twin</i> para conectar todas as operações do início ao fim.	24
Figura 9 – Ilustração de robô autônomo na indústria 4.0.	25
Figura 10 - Conectividade da Indústria 4.0 com outras áreas.	26
Figura 11 - Tela da Plataforma do Google Acadêmico.	30
Figura 12 – Instrução de buscas de aplicações.	30
Figura 13 – Fluxograma da Metodologia.	31
Figura 14 – Gasto Energético nos diversos setores.	33
Figura 15 – <i>Shield</i> desenvolvida para giga de Testes conectada aos sensores e ao Arduino. .	34
Figura 16 – <i>Digital Twin</i> do Sistema de Manufatura.	37
Figura 17 – Peça no ambiente real antes simulação 3D.	38
Figura 18 – Peça no ambiente virtual da <i>Digital Twin</i> em 3D.	38
Figura 19 - Coleção de vetores de entrada-saída para treinamento de redes neural artificial. .	39
Figura 20 - Mapeamento de temperatura do motor.	41
Figura 21 – Arquitetura proposta do veículo RIRS.	42
Figura 22 – Planta industrial em 3D.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
DT	<i>Digital Twin</i> (Gêmeos Digitais)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IoS	<i>Internet of Services</i> (Internet de Serviço)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
MIT	Motor Indução Trifásico
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PI	Proporcional e Integral
RFID	<i>Radio-Frequency IDentification</i> (Identificação por Rádio Frequência)
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
V	Volts
W	<i>Watts</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	13
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	História dos Motores Elétricos	14
2.2	Tipo de Motores Elétricos	15
<i>2.2.1</i>	<i>Motor Elétrico de Corrente Alternada.....</i>	<i>17</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Motor Elétrico de Indução Trifásico - Assíncrono</i>	<i>17</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Motor Elétrico CC</i>	<i>18</i>
2.3	Indústria 4.0	19
<i>2.3.1</i>	<i>Internet das Coisas – IoT.....</i>	<i>21</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Digital Twin</i>	<i>22</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Robôs Autônomos.....</i>	<i>24</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Os objetivos da Indústria 4.0.....</i>	<i>25</i>
<i>2.3.5</i>	<i>Perspectivas da Indústria 4.0 para o Brasil.....</i>	<i>26</i>
3	METODOLOGIA	28
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS	32
4.1	Aplicação de Internet das Coisas – IoT	32
4.2	Aplicação de Digital Twin	36
4.3	Aplicação de Robôs Autônomos	42
5	CONCLUSÃO	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos motores elétricos tiveram início no ano de 1866, quando o cientista alemão Werner Siemens projetou e inventou a primeira máquina geradora de corrente contínua auto-induzida. Entretanto, ao longo da história humana, diversos cientistas tiveram contribuição para o desenvolvimento tecnológico na área de motores elétricos, principalmente no contexto da indústria 4.0 (SENS, 2001).

O contexto da Indústria 4.0 se deu ao longo das revoluções industriais, desde a primeira revolução que se iniciou pela necessidade de suprir a escassez dos produtos manufaturados naquela época de 1760, onde as famílias se reuniam para produzir seus produtos. No ano 1769, o inventor James Watt aperfeiçoou a máquina a vapor e Edmund Cartwright inventou o tear mecânico no ano de 1785 (REVOLUÇÃO INDUSTRIAL INGLESA, 1999). Portanto, essas invenções e aperfeiçoamento marcaram o início da Primeira Revolução Industrial.

Ao longo da segunda revolução industrial no século XIX, se iniciou a manufatura em massa, onde as indústrias tiveram um aumento na produção do aço e desenvolveu a fabricação de máquinas e equipamentos naquela época (FERREIRA; REIS; PEREIRA, 2011). O empresário e inventor Henry Ford adaptou os processos da manufatura artesanal da produção de carros para manufatura em massa, onde Ford buscou a diminuição dos custos de produção do seu automóvel e pagar um salário acessível para seus funcionários, para comprar carros que fabricavam (SACOMANO *et al.*, 2018). Estes processos de novos materiais impulsionam a criação de diversos tipos de motores (elétricos e combustão) para o desenvolvimento da indústria na época.

O início da terceira revolução industrial, no final da década de 1960, desenvolveu a alta tecnologia de ponta (*high-tech*). De acordo com Medeiros e Rocha (2004), a terceira revolução industrial se constituiu de um processo generalizado que repercutiu na dimensão cultural ao chamado pós-modernismo. Assim, essa revolução ficou conhecida pelo desenvolvimento do primeiro controlador lógico programável (CLP), permitindo a programação digital dos sistemas de automação.

Segundo Lin *et al.*, (2018), em 2011 surge o termo Indústria 4.0, ou quarta revolução industrial, na literatura, onde essa definição foi proposta na feira comercial de *Hannover Messe*

por um grupo de trabalho, patrocinado pelo governo da Alemanha. Essa revolução tem como propósito unificar as vantagens das produções em larga escala com individualização, ou seja, fabricando de acordo a necessidade do cliente (FRONTONI *et al.*, 2018).

Portanto, a Indústria 4.0, termo mais utilizado para descrever a estratégia da alta tecnologia de ponta e seu desenvolvimento (PASQUINI, 2020), ocasiona grande mudança no plano social, econômico, político e ambiental. Com o desenvolvimento da tecnologia em diversas áreas como agricultura, automobilismo e nas fábricas foi necessário o investimento de novas tecnologias para suprir a grande demanda global. A tecnologia aplicada aos motores elétricos ganhou espaço, principalmente por prezar pela sua eficiência energética e por facilitar sua manutenção, devido ao aumento de sua demanda nas indústrias.

Com avanço tecnológico, está em ascensão três dos nove pilares da Indústria 4.0. São eles: Internet das Coisas (IoT – do inglês, *Internet of Things*), *Digital Twin* e Robôs Autônomos. Esses pilares tecnológicos apresentam grande desenvolvimento no setor industrial, como o armazenamento de dados na nuvem, comunicação IoT, mapeamento e monitoramento de diversos setores, e até mesmo realizando atividades complexas e de riscos para o homem.

Esses pilares auxiliam no desenvolvimento e desempenho dos motores elétricos, gerando eficiência energética e prevendo futuras manutenções dos equipamentos. Pois a IoT realiza a comunicação e armazenamentos de dados analisados pela *Digital Twin*, que executa o monitoramento e análise dos motores elétricos, através de simulações térmicas em três dimensões (3D). Toda essa comunicação, armazenamento de dados e análise dos equipamentos é feita de forma autônomos, pelos robôs inteligentes, auxiliando o homem nas atividades complexas do cotidiano.

1.1 Justificativa

Os motores elétricos são responsáveis pela origem de muitos equipamentos elétricos atualmente. O exemplo disso é quantidade de equipamentos elétricos e eletrônicos que estão presentes em nossas casas, como liquidificador, geladeiras, máquinas de lavar roupa, entre outros. Além disso, na indústria é comum ter a presença desse importante equipamento em esteiras, elevadores, compressores e todo o tipo de maquinário. Com o surgimento de novas tecnologias como IoT, *Digital Twin*, Robôs Autônomos, entre outras, é possível realizar um aumento na eficiência de motores no ambiente industrial, uma vez que essas tecnologias promovem economia de energia e manutenções preditiva e preventiva mais assertivas.

Assim, o advento da indústria 4.0 tem o objetivo de tornar o ambiente industrial não apenas mais eficiente, mas também mais seguro. Segundo dados publicados pela Agência Brasil

(2021), o setor industrial brasileiro apresentou crescimento com expectativa de continuação da expansão e crescimento de vagas de emprego. Neste contexto, tornando a indústria mais eficiente e segura para garantir mais vagas de emprego, melhor qualidade de vida para os empregados e mais rentabilidade para o setor.

Como o motor elétrico é um dos principais equipamentos no ambiente industrial, foi realizado um mapeamento de tecnologias desenvolvidas visando a melhoria do desempenho deste equipamento que é de suma importância para a avaliação do impacto que essas novas tecnologias vêm trazendo para o ambiente industrial, tanto no aspecto econômico quanto social.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é compreender a importância das novas tecnologias que são aplicadas na indústria e realizar um mapeamento da aplicação destas em motores elétricos, principalmente aquelas aplicações que visam alcançar os objetivos da indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, elenca-se:

- Analisar o desenvolvimento dos motores elétricos ao longo da história;
- Descrever sobre a importância da indústria 4.0;
- Apresentar as novas tecnologias, realizando mapeamento no contexto da indústria 4.0;
- Apresentar ao leitor a importância das novas tecnologias aplicadas;

Capítulo 2

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 História dos Motores Elétricos

Ao longo da história, o mundo continua em constante evolução de tecnologias e inovações. Dessa forma, os motores elétricos facilitaram o desenvolvimento referente às indústrias e ao dia a dia das pessoas. Em apenas três séculos, foram realizados os primeiros estudos, invenções e pesquisas relacionadas até a fabricação do primeiro motor elétrico em 1886. Essa descoberta é designada ao cientista alemão Werner Siemens, que inventou o primeiro gerador de corrente contínua (CC) auto-induzida (Museu WEG, 2018). Na Figura 1, temos a ilustração Werner Siemens testando seu primeiro gerador de corrente contínua.

Figura 1 – Werner Siemens testando seu gerador de CC.



Fonte: Museu WEG de Ciência e Tecnologia (2018).

Após a invenção do primeiro gerador de corrente contínua, o engenheiro Nikola Tesla contribuiu com desenvolvimento dessa máquina geradora de energia. No ano de 1883, Tesla desenvolveu o primeiro gerador de corrente alternada (CA). Com isso, os polos se invertem, e a corrente passou a ser gerada de forma alternada, como as que hoje chegam às tomadas (HEYMANN, 2016).

Tesla desenvolveu um sistema chamado de Tesla-Westinghouse, mas naquela época não teve tanto sucesso em sua nova descoberta. Porém, foi utilizado pela primeira vez na cidade de Chicago, no ano de 1893 para fornecer iluminação durante uma feira chamada *World's*

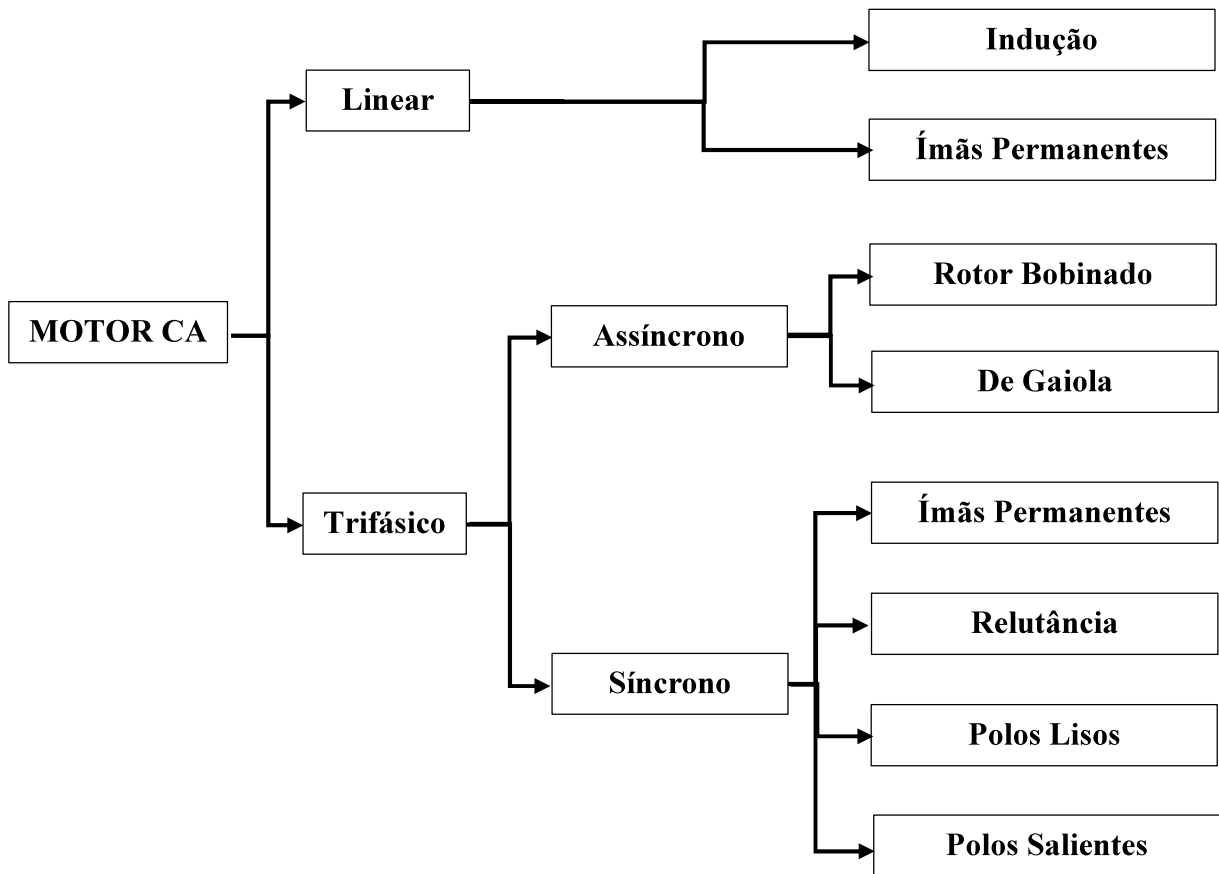
Columbian Exposition, meses depois sua invenção foi utilizada para fornecer energia para os geradores das cataratas do Niágara (HEYMANN, 2016).

2.2 Tipo de Motores Elétricos

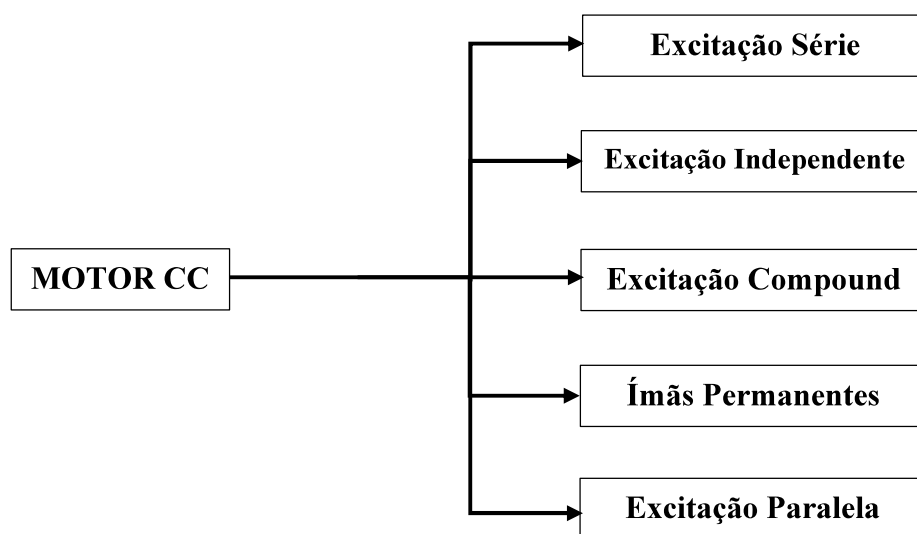
Os motores elétricos são denominados como máquinas que são capacitados para fazer a conversão de energia elétrica em energia mecânica (PETRUZELLA, 2013). Existem diversos tipos de motores, principalmente os elétricos que possuem dois grupos de motores, são eles: motor de CA e CC. Algumas diferenças desses motores elétricos, são que (ILLUSTRATION PRIZE, 2020):

- Os motores CA possuem características como: potência trifásica ou monofásica da rede de alimentação; não possuem processo de comutação; funcionam com alimentação trifásico ou monofásico; possuem 3 terminais de entrada de alimentação; depende de equipamento para acionamento; Armadura do motor é estacionária e o campo magnético gira e custo de manutenção barato.
- Os motores CC possuem características como: fonte de suprimento de baterias, células etc.; possuem processo de comutação; possuem apenas dois terminais (positivo e negativo); utilizado para aplicações pequenas e domésticas e custo elevado para manutenção.

Os Motores elétricos CA e CC possuem suas classificações como motores assíncronos, síncronos, ímãs permanentes e entre outros grupos conforme apresentado nas Figuras 2 e 3 que foram adaptadas do Guia de especificação da WEG.

Figura 2 - Classificação motor CA.

Fonte: Adaptado do Guia de especificação da WEG (2021, p. 6).

Figura 3 - Classificação motor CC.

Fonte: Adaptado do Guia de especificação da WEG (2021, p. 6).

2.2.1 Motor Elétrico de Corrente Alternada

Os motores CA são divididos em dois grupos: os síncronos que funcionam com velocidade dada pelo campo de estator, já os motores assíncronos ou de indução, possuem baixo custo, simplicidade, potência e possibilita o controle de sua velocidade através de inversores de frequência, nos proporcionando uma extensa gama de aplicações (ROCHA, 2019).

2.2.2 Motor Elétrico de Indução Trifásico - Assíncrono

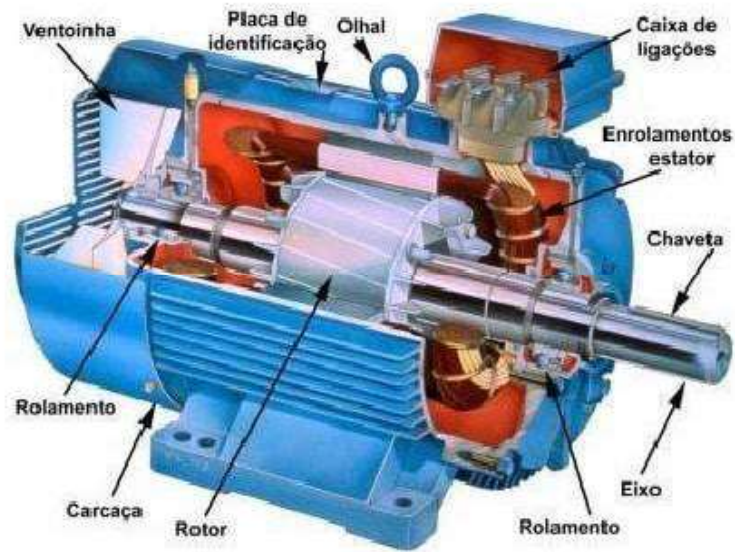
O funcionamento deste tipo de máquina é baseado na presença de três bobinas que são fabricadas em fio de cobre esmaltado. Quando essas bobinas são alimentadas, a rede trifásica ocasiona uma circulação de corrente elétrica no interior do estator que gera uma defasagem de 120° e posteriormente gerando um campo magnético girante no entreferro do estator rotacionando a uma velocidade síncrona limitada pela quantidade de pólos magnéticos no motor (CRUZ; BERWANGER, 2015).

Esses motores possuem aplicações industriais, pois possuem quatro condutores de alimentação de energia elétrica, podendo receber tensões entre 220/380V em 380/660V. Logo, não precisa de uma força externa para realizar seu funcionamento, pois a força eletromagnética é maior e fazendo que o estator consiga vencer o estado da inércia sem o auxílio de forças externas.

Dessa forma, o motor CA assíncrono possui apenas as bobinas do estator energizadas e o movimento do rotor é realizado pela indução eletromagnética. Existe uma diferença de velocidade entre o rotor e o campo magnético girante do estator, denominada escorregamento. Assim, o funcionamento se dá pela velocidade baixa do rotor do que a do campo girante do estator.

Na Figura 4 são apresentados os principais componentes dos motores trifásicos assíncronos, como: eixo, ventoinha, caixa de ligações, enrolamentos do estator, rotor carcaça, rolamento, olhal e placa de identificação do motor.

Figura 4 – Motor elétrico trifásico.



Fonte: Luciano-Abecom (2022).

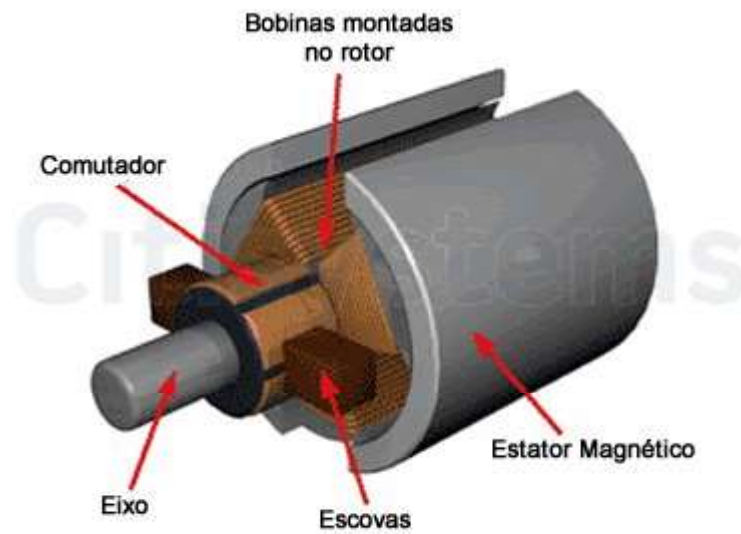
2.2.3 Motor Elétrico CC

O motor CC é uma máquina que funciona através da CC, podendo ser uma alimentação por baterias ou outro tipo de alimentação CC. Entretanto a comutação do motor é realizada através das escovas ou sem escovas (*brushless*) que controla a velocidade, logo a máquina CC é controlada pela variação de tensão (DIMENSIONAL A SONEPAR COMPANY, 2020).

A principal aplicação é relacionada com a variação da velocidade ao longo do processo de seu desempenho e torque para as cargas. Entretanto, a manutenção desta máquina deve ter um planejamento preliminar minucioso, pois os componentes que compõem possuem um desgaste proporcional ao uso da máquina e gera um alto valor agregado em relação aos motores de CA. Todavia, esta forma de manuseio, torna necessário para conhecimento e experiência (NASCIMENTO JUNIOR, 2011).

Este tipo de motor tem os seguintes componentes como: Comutador, bobinas montadas no rotor, estator magnético, escovas e eixo acoplado ao rotor onde é a parte girante. Portanto, possui um estator que é composto por um ímã e um comutador que faz o funcionamento de transferência da energia da fonte de alimentação para o rotor da máquina. Na Figura 5 apresenta principais componentes dos motores CC, como: eixo, comutador, bobinas montadas no rotor, escovas e estator magnético.

Figura 5 – Motor CC e suas partes.



Fonte: Citisystems (2016).

2.3 Indústria 4.0

A indústria 4.0 ou automação industrial denomina-se como tecnologias desenvolvidas para realização de atividades de acordo com controle dos mecanismos, com intuito de melhorar os processos de manufatura (ENGRENAR JUNIOR, 2020). Portanto, abrange diversas áreas como mecânica e eletrônica, que são grandes responsáveis pela alta produtividade e proporcionam segurança para as indústrias.

De acordo com Engrenar Junior (2020), essa automação industrial consiste na transferência de trabalhos realizados por um conjunto de elementos tecnológicos, visando sempre a segurança e qualidade de um processo que será aplicado. Dessa forma, os processos industriais necessitam de grande capacidade produtiva, bem como a redução dos custos e demanda, logo, necessitam de maiores números de máquinas automatizadas para sua linha de produção.

As principais características da Indústria 4.0 são o alto nível de condição de automação e ampla capacidade de autonomia para tomadas de decisões. O evento histórico que iniciou a quarta Revolução Industrial foi a associação da Internet dos Serviços (IoS) e IoT nos processos de manufaturas (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). E com o passar do tempo, os sistemas de automação se tornaram abertos e possibilitaram maior conexão dos processos como forma de melhorar o chão de fábrica. A indústria 4.0 possui nove pilares tecnológicos fundamentais, como: *Big Data*, Robôs autônomos, Realidade Aumentada simulação, Integração

com Sistemas, Manufatura Aditiva, Cyber Segurança, Computação em Nuvem e Internet das Coisas (IoT) (RÜBMANN *et al.*, 2015). Na Figura 6 demonstra os nove pilares da indústria.

Figura 6 – Pilares da Indústria 4.0.



Fonte: Sigga Technologies (2021).

Portanto podemos compreender esses nove pilares da indústria 4.0 nos tópicos abaixo, como (SIGGA TECHNOLOGIES, 2021):

- **Big Data:** Indústria 4.0 utiliza a coleta e análise de grandes volumes de dados por meio de *softwares* avançados como fonte primária e utilizando *Big Data*, é possível tomar decisões com base em dados reais e em tempo real.
- **Robôs Autônomos:** são comuns nas fábricas, estão evoluindo com novas funcionalidades e tecnologias e tornando cada vez mais autônomos e capazes de realizar tarefas consideradas de alto risco ou complexas para os seres humanos.
- **Realidade Aumentada:** envolve a fusão entre os ambientes *online* e *off-line*, portanto a Realidade Aumentada tem um papel importante nesse processo, embora ainda esteja em fase inicial de desenvolvimento. O *Digital Twin* também integra esse pilar da indústria.
- **Simulação:** a simulação computacional e as ferramentas de *Computer Aided Engineering* (CAE) estão sendo aplicadas em diversos setores da indústria para analisar

processos de fabricação e comportamento em ambientes virtuais antes de serem implementados na realidade. Portanto a *Digital Twin* também integra esse pilar.

- **Integração com Sistemas:** são utilizados para evitar problemas de comunicação entre as equipes internas e externas da empresa, como clientes e fornecedores.
- **Manufatura Aditiva:** utilizada para facilitar a construção de protótipos, como, por exemplo, a impressão 3D, e acelerar a realização de modificações, permitindo a criação de produtos personalizados de forma rápida e eficaz
- **Cyber Segurança:** são sistemas conectados e integrados, a segurança da informação se torna ainda mais importante. São necessárias soluções de segurança cibernética capazes de garantir os sistemas de monitoramento protegidos contra ataques externos.
- **Computação de Nuvens:** são dados e informações compartilhados pela internet e armazenados nas nuvens, tornando acessíveis de qualquer lugar e independentes da capacidade dos computadores ou dispositivos individuais
- **Internet das Coisas:** a Conectividade dos equipamentos e dispositivos à internet, surgem diversas possibilidades, como a operação remota e a comunicação entre máquinas.

Portanto, este trabalho realizou mapeamento de três pilares (Internet das Coisas, Robôs autônomos e *Digital Twin*) da Indústria 4.0 que são aplicados nos motores elétricos. Nos itens abaixo contextualiza sobre essas três tecnologias, para buscar melhor eficiência e desempenho dos motores. Diferentemente da IoT e Robôs Autônomos, a tecnologia da *Digital Twin* utiliza dois pilares da indústria 4.0 para se estabelecer, como a Realidade Aumentada e Simulação.

Pois compreende a realidade física e virtual para realizar simulações de equipamentos (mapeamento térmico de motores) reais no ambiente virtual através de simulações. No item 2.3.2 é contextualizado sobre essa nova aplicação da Indústria 4.0.

2.3.1 Internet das Coisas – IoT

O termo IoT foi citado por Kevin Ashton, do Instituto de Tecnologia de Massachussetts, numa apresentação sobre a tecnologia RFID e a Cadeia de Suprimentos da *Procter & Gamble* (P&G) em 1999 (ASHTON, 2009). Essa tecnologia tem como base um conceito em que o mundo virtual e real se conectam, criando um mundo inteligente em diversos segmentos da sociedade. A tecnologia IoT é aliado da *Big Data*, que possibilita uma variedade enorme de criação e ampliação em novos negócios na área da tecnologia que são muito importantes na Indústria 4.0 (DIAS, 2016).

um tipo de ciclo de vida de um produto da manufatura, foi dividido em três partes (GRIEVES¹, 2011 *apud* SOUZA, 2021):

1. Parte Física no espaço real;
2. Parte Cibernética no espaço virtual;
3. Parte de Conexão de dados entre ambas as partes (Física e Cibernética);

Em 2010 esse novo conceito de tecnologia foi reformulado pela NASA que propôs a primeira definição específica que foi aceita sobre o conceito de *Digital Twin*, que foi publicado no documento “NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap” que estabelece como:

Uma simulação probabilística, multifísica e multiescala integrada de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico de frota etc., para espelhar a vida de seu gêmeo voador. O gêmeo digital é ultrarrealista e pode considerar um ou mais sistemas de veículos importantes e interdependentes. (SHAFTO *et al.*, 2010, p. 7).

Com a ascensão desta tecnologia nas áreas de conhecimento de máquinas, computação na nuvem, IoT, robôs autônomos e entre outras tecnologias que se baseiam-se na indústria 4.0, expandiu-se a quantidade de pesquisadores acarretando o surgimento de diversas definições para *Digital Twin*. Uma dessas definições é que podemos substituir objetos reais por objetos virtuais, que consistem nas representações virtuais e recursos de comunicação para compor objetos inteligentes que possam operar como nós seres humanos na IoT e IoS (SCHLUSE; ROSSMANN, 2016).

Para Rasheed, San e Kvamsdal (2020) essa tecnologia pode ser definida como uma representação virtual de um ativo físico que é ativado através de dados e simuladores de previsão, monitoramento, tomada de decisão em tempo real e controle do processo.

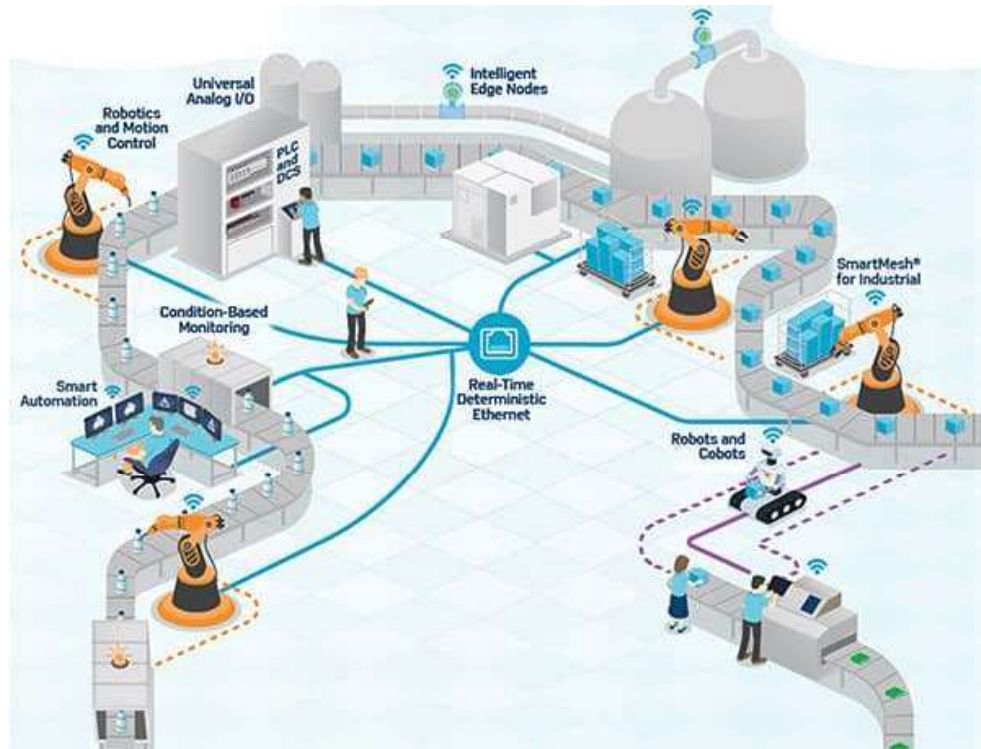
De acordo com Souza (2021), a tecnologia *Digital Twin* teve grande evolução no seu conceito no que se refere as representações virtuais para componentes de fabricação, como produtos, ativos, definições de processos e até com pessoas. Segundo Baker (2021), o conceito mais explicativo da *Digital Twin* é a criação de um modelo virtual de ambiente para realizar planejamento da complexidade do início ao fim de vida de um produto da produção industrial.

Portanto, esse processo da *Digital Twin* realiza toda conexão operação da indústria, através armazenamento e captura de dados para realizar previsão futuras, utilizando os *softwares* de simulações, como demonstrado na Figura 8. Onde utiliza a *Digital Twin* para

¹ GRIEVES, Michael. **Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management**. [S.l.]: Space Coast Press, 2011.

conectar todas as operações do chão de fábrica da indústria, para melhorar desempenho e eficiência no setor.

Figura 8 - Chão de fábrica eficiente utiliza a tecnologia *Digital Twin* para conectar todas as operações do início ao fim



Fonte: Baker (2021).

2.3.3 Robôs Autônomos

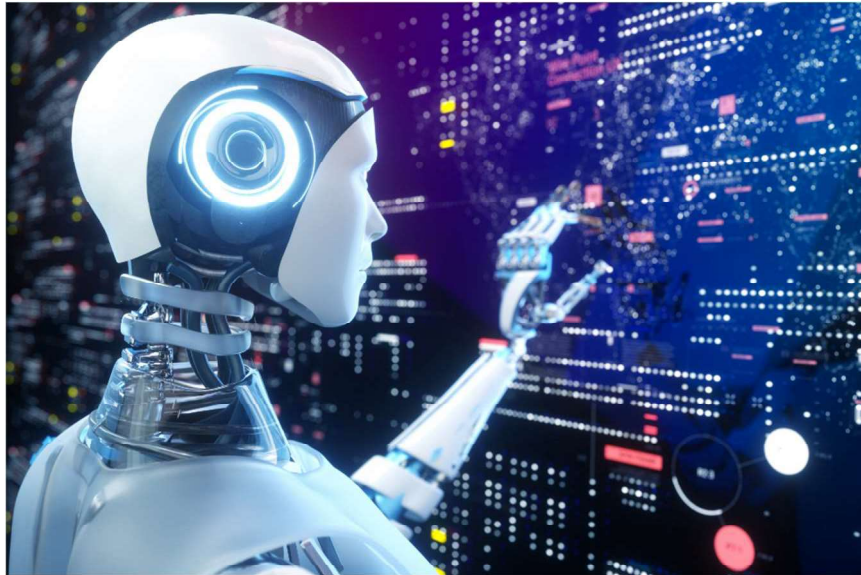
De acordo Bekey (2005), os robôs autônomos possuem Inteligência Artificial (IA), pois são máquinas que podem pensar e agir com autonomia, logo são sistemas capazes de realizar atividades no ambiente real, sem qualquer intervenção humana por longos períodos. Então pode se afirmar que os Robôs Autônomos são capazes de operar e tomar decisões por longos períodos de atividades nos setores da Indústria 4.0, e tem como finalidade realizar a conexão entre as indústrias e realidade virtual.

A Pesquisa Mundial de Robótica, publicada pela Federação Internacional de robótica (*International Federation of Robotics – IFR*, 2016), define que os robôs autônomos industriais estão modernizando e revolucionando a economia mundial, com isso, foram instalados mais de 1,4 milhões de robôs autônomos industriais nas fábricas pelo mundo até 2019 (*International Federation of Robotics*², 2016 apud Albertin *et al.*, 2017).

² INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS (IFR) **World Robotics Survey 2016**. 2016.

Segundo Albertin *et al.*, (2017), esses robôs proporcionam o enfrentamento de novos desafios na produção, pois permite automatizar os processos totalmente manuais de uma linha de produção. Na Figura 9 visualizamos ilustração de um robô inteligente, que realiza atividades complexas e perigosas para homem.

Figura 9 – Ilustração de robô autônomo na indústria 4.0.



Fonte: Del Carmen (2021).

2.3.4 Os objetivos da Indústria 4.0

A indústria 4.0 tem por objetivo a super conectividade entre diversos componentes em diferentes setores, que nos permite a realização de atividades diárias de modo automatizado e repentino por meio de cabos TCP/IP ou Wireless, IoT, armazenamento através das nuvens ou sistemas cibernéticos são aplicados em diversas áreas para desenvolvimento e aumento da produtividade e segurança de dados, que podem ser criptografados para segurança do sistema (ENGENHARIA-PRESYS, 2022).

Na Figura 10 podemos visualizar exemplo da conectividade que a indústria 4.0 pode alcançar em fábricas, logística, construção civil, comunicação e outras diversas áreas aplicadas.

Figura 10 - Conectividade da Indústria 4.0 com outras áreas.



Fonte: Engenharia-Presys (2022).

A Indústria 4.0 ocasionou grandes impactos éticos e sociais, pois com o avanço das tecnologias, as máquinas podem adquirir grande capacidade de autonomia para tomada de decisões, podendo contratar para uma vaga de emprego e definindo um tratamento médico, com isso surgem questões éticas totalmente novas. Como serão definidas essas regras para tais soluções? Como definir essas decisões tomadas pelas máquinas quando provocam desvantagens às pessoas? (MAGALHÃES; VENDRAMINI, 2018).

2.3.5 Perspectivas da Indústria 4.0 para o Brasil

De acordo com FIRJAN (2016), em 2016 pesquisas relacionadas sobre a Indústria 4.0 no Brasil indicaram que indústrias se desenvolveram semelhante à segunda e terceira revolução industrial, pois sua linha de produção está migrando para aplicação da automação. Porém, a área industrial mais desenvolvida em relação a indústria 4.0 é o setor automotivo, de acordo a publicação, pois os colaboradores da área estão em constante evolução conforme a demanda do mercado.

Essa inserção de tecnologias aplicadas na Indústria 4.0 no cenário do Brasil, trouxe diversas dificuldades e desafios para diferentes setores (FIRJAN, 2016), como:

- I. A construção de políticas planejadas e incentivos governamentais.
- II. Realizar reunião com empresários e gestores com postura proativa.
- III. Realização do Desenvolvimento tecnológico e formação dos profissionais, próximo a indústria.

O Serviço Nacional de Aprendizagem (SENAI, 2020), realizou um estudo através do programa piloto Indústria Mais Avançada entre os anos de 2018 e 2019, onde constatou que 43

empresas de 23 estados do Brasil, o impacto na produção industrial ainda se utiliza o uso de ferramentas de baixo custo como: armazenamento na nuvem, sensoriamento e IoT.

Por fim, segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2018), no ano de 2018 menos de 2% das organizações do Brasil se desenvolveu conforme a Indústria 4.0 avança. Com isso totalizando um desperdício de aproximadamente US \$15 trilhões nos próximos 15 anos, segundo a análise da ABDI. De acordo com essas análises, fica nítido que o Brasil precisa de muitos anos para se desenvolver quando o assunto é sobre Indústria 4.0.

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

Com objetivo de fornecer uma revisão geral das aplicações das tecnologias e motores elétricos no contexto da indústria 4.0, foi realizado um mapeamento das principais tecnologias utilizadas na indústria. Esta pesquisa trata-se, portanto, de uma revisão bibliográfica.

De acordo com Oliveira (1999), a revisão bibliográfica, ou análise documental, tem o objetivo de identificar as informações em documentos conforme os problemas e objetivos da pesquisa. Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.

Para realizar o levantamento bibliográfico, foram utilizadas as seguintes bases de dados: Scielo, Google Acadêmico, Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEE), e sites governamentais. Como parâmetros de buscas foram definidas as seguintes palavras-chave: motores elétricos, Indústria 4.0, Eficiência Energética, Internet das Coisas (IoT), *Digital Twin* e Robôs Autônomos. Visando definir os resultados e rápido crescimento do número de publicações dos últimos anos, foram utilizados os seguintes critérios de inclusão e exclusão para a seleção dos artigos:

1. **Critério de inclusão:** artigos e trabalhos nos idiomas inglês e português, publicados a partir do ano de 2015 até o momento, baseando-se nos 3 pilares da indústria 4.0 e motores elétricos (IoT, *Digital Twin* e Robôs Autônomos). Portanto, foram selecionados 67 artigos para a realização da pesquisa.
2. **Critério de exclusão:** Artigos não relacionados com as palavras-chave, com ano de publicação inferior ao ano de 2015 e que estejam em outros idiomas que não sejam inglês e português.

O Google Acadêmico é plataforma digital mais explorada para a elaboração deste trabalho, funciona como um site de busca tradicional, conforme vamos pesquisando ele vai nos retornando os resultados de busca ordenados. De acordo com as palavras chaves, são retornados artigos ou publicações relacionados a busca, e para obter os melhores resultados, leva-se em consideração o autor do livro ou artigo, publicação (os mais atuais e renomados), e a frequência com que ela é citada em outras pesquisas, com isso foi utilizado o método de pesquisa avançada

que é uma ferramenta fornecida pelo Google Acadêmico que serve para filtragem de trabalhos e artigos.

Na Figura 11 apresenta a tela virtual do Google acadêmico e na Figura 12 demonstra o passo a passo das buscas de aplicações relacionadas ao tema desse trabalho, como:

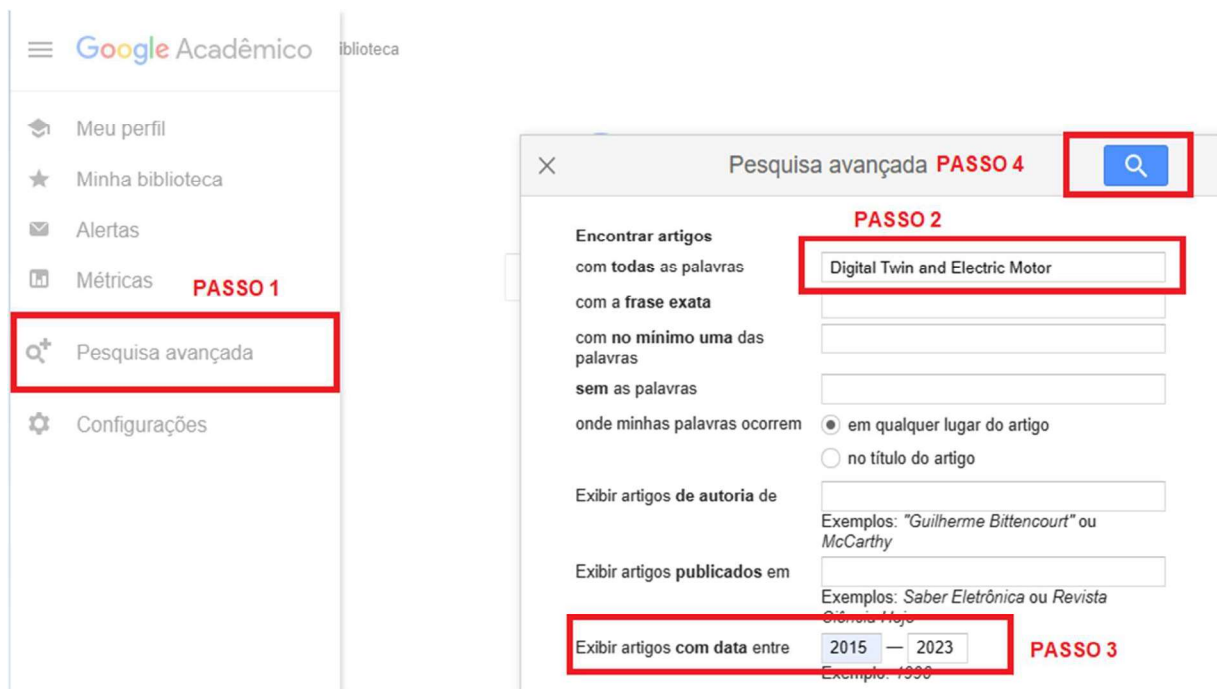
- Passo 1: pesquisa avançada, para especificar as buscas;
- Passo 2: adicionar as palavras chaves. No caso do trabalho, foram escolhidas as palavras: motores elétricos, Indústria 4.0, Eficiência Energética, Internet das Coisas (IoT), Digital Twin e Robôs Autônomos;
- Passo 3: definir até que ano os trabalhos foram publicados;
- Passo 4: selecionar as buscas;

Figura 11 - Tela da Plataforma do Google Acadêmico.



Fonte: Plataforma do Google Acadêmico (2023).

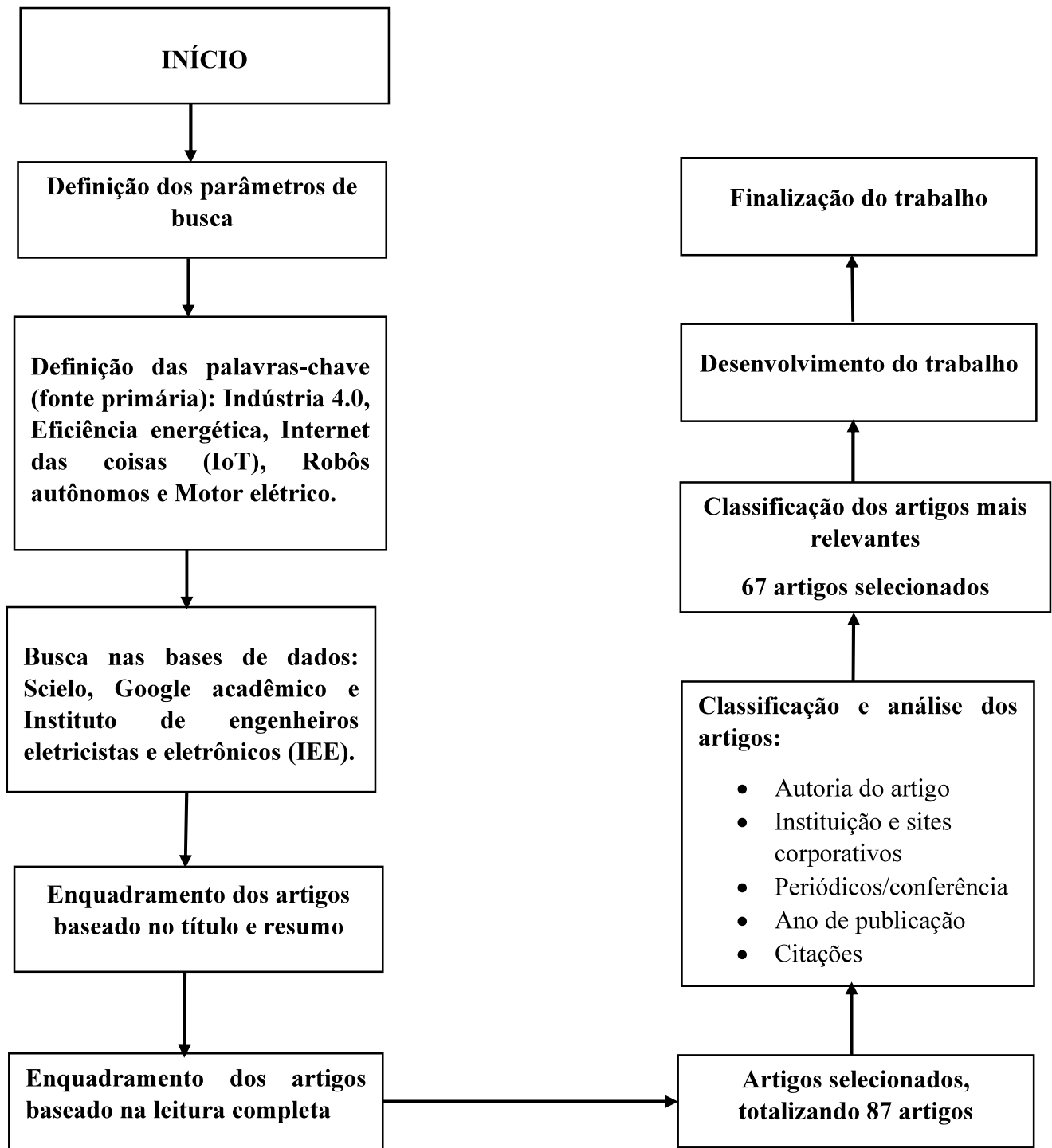
Figura 12 – Instrução de buscas de aplicações.



Fonte: Plataforma de Google Acadêmico 2023).

Para melhor compreensão da metodologia, foi elaborado um fluxograma dos métodos para elaboração do trabalho de conclusão que apresenta as delimitações proposto pelo autor do presente trabalho, demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma da Metodologia.



Fonte: Autoria própria.

Capítulo 4

4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

Neste capítulo foi realizado um mapeamento de tecnologias aplicadas em motores elétricos no contexto da indústria 4.0, onde serão apresentados e analisados trabalhos de conclusão de curso, dissertações e artigos para discutir sobre essas tecnologias. Com base na pesquisa bibliográfica de dados e informações coletados, foram escolhidas as seguintes tecnologias aplicadas:

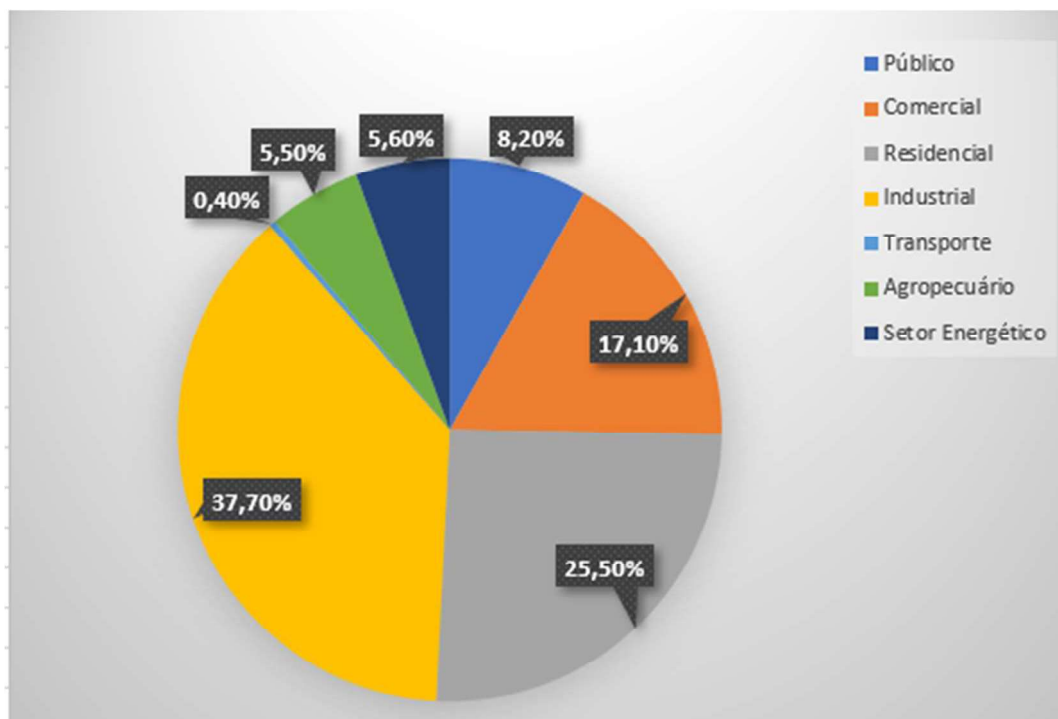
- a) Internet das Coisas – IoT;
- b) *Digital Twin*;
- c) Robôs Autônomos;

4.1 Aplicação de Internet das Coisas – IoT

Moreira e Nascimento (2020) desenvolveram um projeto que teve como proposta desenvolver um controlador (baseado na tecnologia IoT) para demanda de energia elétrica. O protótipo desenvolvido teve como objetivo o controle e monitoramento do consumo de energia elétrica numa indústria. Analisando o sistema de eficiência energética das indústrias, baseado nos dados do Balanço Energético Nacional de 2018, o setor industrial do Brasil é o que gerou maior demanda de energia elétrica.

De acordo com EPE (2018), a demanda industrial em 2018 correspondia aproximadamente 37,7% de gasto energético em comparação com outros setores, como mostrado na Figura 14. Portanto, foi possível realizar o desenvolvimento da proposta para o sistema controlador de demandas.

Figura 14 – Gasto Energético nos diversos setores.



Fonte: Adaptado de EPE (2018).

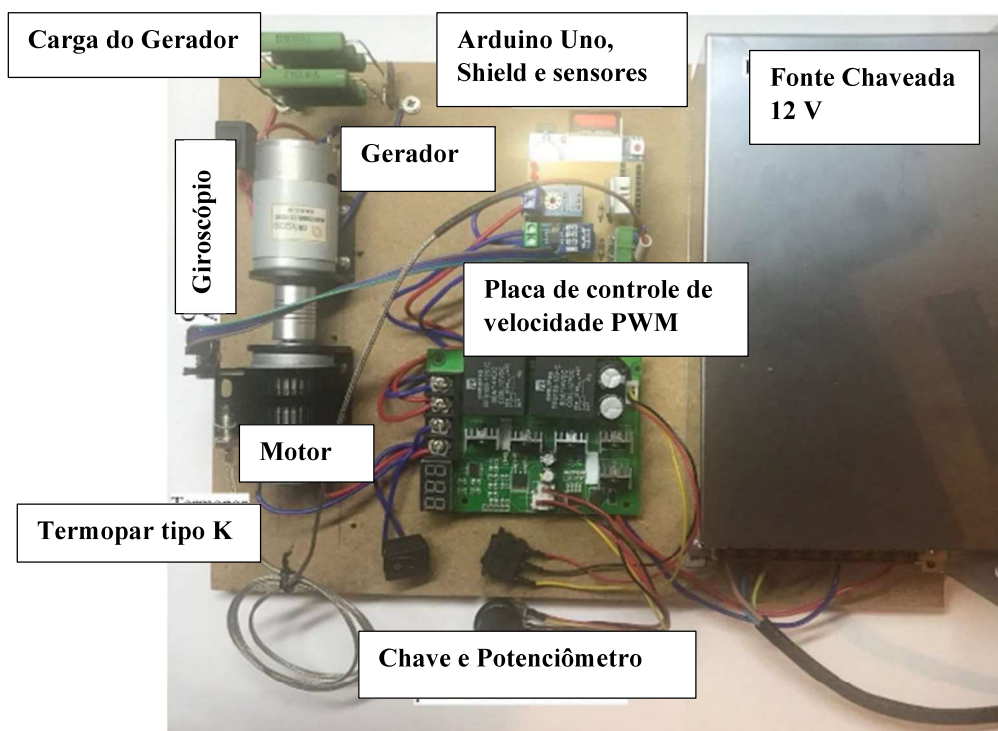
O protótipo desenvolvido foi baseado na IoT, onde realizou um trabalho prático para fusão de várias cargas a um *Dashboard online* e interativo que foi habilitado a transmitir informações sobre diversas variáveis incluídas no processo de gestão do consumo energético de uma indústria, permitindo a comunicação entre o sistema e o usuário. A partir disso foi possível adicionar os dados da demanda contratada e a viabilização e o controle de cada uma das cargas foram viabilizados.

Pode-se concluir que após os testes realizados, o controlador de demanda industrial baseado em IoT, obteve sucesso na funcionalidade, pois cumpriu todos os objetivos definidos no projeto. Porém, segundo Moreira e Nascimento (2020), os materiais utilizados não podem ser utilizados como aplicação industrial, pois são aplicáveis apenas em projetos como protótipo. Outro ponto negativo encontrado durante os testes foi o tempo de comunicação entre os dispositivos, pois conforme a realidade da indústria, não pode ser aplicada para eventual chão de fábrica.

De toda forma, a aplicação de um controlador de demanda baseado em IoT é aplicável no ponto de vista do monitoramento da eficiência de motores elétricos, uma vez que esses motores se tornam menos eficientes quando se aproximam do fim de sua vida útil, consumindo mais energia (TEIXEIRA,2017).

No trabalho de Vieira (2021), foi elaborado um trabalho sobre *Framework*³ IoT para realizar uma análise do desempenho de motores elétricos trifásicos. De acordo com o autor, a proposta era realizar um modelo de manutenção preventiva (fornecido pelos fabricantes) dos motores elétricos e dispositivos de maneira correta, já que esses equipamentos funcionam por longos períodos. Na Figura 15, podemos visualizar o protótipo do projeto com seus componentes em destaques, que utiliza IoT para monitoramento e análise do desempenho do motor.

Figura 15 – *Shield* desenvolvida para giga de Testes conectada aos sensores e ao Arduino.



Fonte: Adaptado de Vieira (2021, p. 9).

Com esse modelo de manutenção preventiva, o autor estabeleceu regras que definiram as atividades e o período de manutenção dos motores elétricos, para facilitar a manutenção e garantir os processos do chão de fábrica operando com eficiência. Para isso, o protótipo se fundamentou nos conceitos da Indústria 4.0, utilizando novas tecnologias na área de dispositivos conectados a IoT, sistema de sensoriamento eletrônico e *Big Data*.

Além disso, de acordo com Vieira (2021), foi possível aperfeiçoar os sistemas de análise de desempenho e falhas em motores elétricos trifásicos, onde as ferramentas utilizadas

³ **Framework:** são estruturas composta por conjuntos de códigos que possibilita o desenvolvimento de diversos sistemas e aplicações, funciona como um *template* ou modelo que permite utilizar diversas ferramentas na criação de alguma aplicação ou *software* (BARRO, 2022).

viabilizaram as previsões de falhas dos motores e com base nos dados coletados foi possível gerenciar a produção da indústria e a manutenção, possibilitando a redução dos custos.

Rios *et al.*, (2019) desenvolveu monitoramento das grandezas físicas (Corrente, Tensão e Temperatura) do motor de indução trifásico, utilizando a IoT, com objetivo de desenvolver um sistema de monitoramento de motores elétricos com baixo custo, seguindo as tendências da indústria 4.0

De acordo com Rios *et al.*, (2019), o monitoramento pode ser realizado durante o funcionamento do motor, onde é realizado a leitura, processamento e transmissão de dados por dois microcontroladores. Com isso, os dados obtidos da sobrecorrente, sobretensão e temperatura são armazenados na nuvem, utilizando a tecnologia IoT. Segundo o autor, esses dados obtidos e armazenados na nuvem são disponibilizados no *software ThingSpeak*⁴ e realizando a comunicação com aplicativo *Telegram*[®] (usuários cadastrados), que são disponíveis para *smartphones* (RIOS *et al.*, 2019).

A análise final de Rios *et al.*, (2019) para o projeto prático aplicando a tecnologia IoT para o monitoramento de desempenho do motor elétrico de indução trifásico, foi que o protótipo atingiu os resultados esperados como a leitura, armazenamento e transmissão de dados através dos testes práticos. Logo, é viável a aplicação dessa tecnologia na indústria, pois os materiais e *softwares* são acessíveis e se demonstrou eficiente para sua proposta de aplicação. Segundo o autor é possível realizar novas melhorias no seu projeto, pois tem grande potencial de aplicabilidade, e com isso pode se tornar um projeto comercial.

Mausbach (2019) desenvolveu um método de monitoramento de motores de CC utilizando a IoT, para monitorar os motores CC com escovas e ímãs permanentes, baseando-se nos conceitos de monitoramento de condição. O método utiliza um módulo que realiza coleta de dados e processamento embarcado habilitado para oferecer informações necessárias aos sistemas de gerenciamento das aplicações mediante ao sensoriamento da velocidade de rotação e corrente consumida pelo motor elétrico. O sistema de monitoramento nos permite realizar o acompanhamento do funcionamento do motor CC.

O objetivo do projeto desenvolvido por Mausbach (2019) é realizar comparações de dados medidos através dos sensores, utilizando um método de modelo matemático dos motores. Este modelo foi obtido através de uma revisão bibliográfica, para saber os diferentes tipos de

⁴ **ThingSpeak**[®]: é uma plataforma IoT com acesso gratuito, onde realiza *upload* de dados numéricos que são lotados na forma de gráficos. Com isso é possível monitorar dados obtidos como umidade, pressão, temperatura, luminosidade etc., utilizando a IoT através da *internet* (BERTOLETI, 2020).

comportamento do motor CC quando é exposto a condições extremas de operação, analisando e considerando a variação da carga, tensão de alimentação e temperatura (MAUSBACH, 2019).

O método de funcionamento do projeto consiste em utilizar sensores com sistemas embarcados nos motores monitorados em conjunto com um processador para realizar a criação de um motor inteligente, capaz de transmitir seu estado de funcionamento, medindo o consumo e velocidade para informar o estado de operação do motor (falhas e desgastes de componentes), permitindo para futura manutenção e implementação da função de liga/desliga para proteger o sistema na qual está instalado. Segundo o autor, esse método de monitoramento também pode ser aplicado em outros tipos de motores elétricos que possam se adaptar ao sistema.

Quero, Behrens e Fabricio (2018) apresentaram resultados de dados obtidos através da implementação das técnicas de análises de dados, que foi aplicado num cenário real de monitoramento de corrente elétrica consumidas por motores elétricos trifásicos através da IoT. Segundo os autores, essa técnica de análise foi aplicada em uma máquina de linha de produção de autopeças com o propósito de relacionar dados obtidos, visando possibilidades de identificar falhas e possibilitando a implementação de um método de estratégia para supervisionar o processo produtivo.

O objetivo dessa técnica implementada visa monitorar equipamentos elétricos da linha de produção, para detectar o estado de funcionamento dos motores, onde verifica se os dados estão dentro do valor estabelecido como normal e esse sistema de monitoramento foi baseado no contexto de arquiteturas de redes de sensores, com possibilidade de transmitir os dados armazenado através da IoT.

Por fim, concluiu-se que após realizar análise desenvolvido e testado na produção de autopeças, os resultados são consistentes nos testes e mostrando que o objetivo foi atingido. Portanto, tem grande contribuição para expandir os conhecimentos relacionados ao monitoramento dos dados obtidos das aplicações, utilizando a tecnologia IoT.

4.2 Aplicação de Digital Twin

Souza *et al.*, (2021) apresentou uma proposta utilizando a tecnologia Digital Twin de criação de ambientes virtuais se baseando nos conceitos de comissionamentos virtuais e aplicando em um motor gráfico de Unity3D, pois a falta de padronização de conceitos da Digital Twin se tornou comum, acarretando diversos métodos necessários para desenvolver o ambiente virtual dos processos físicos.

A proposta visa desenvolver os processos de manufatura na indústria na forma virtual, tendo como base a utilização do comissionamento virtual como técnica para se obter os

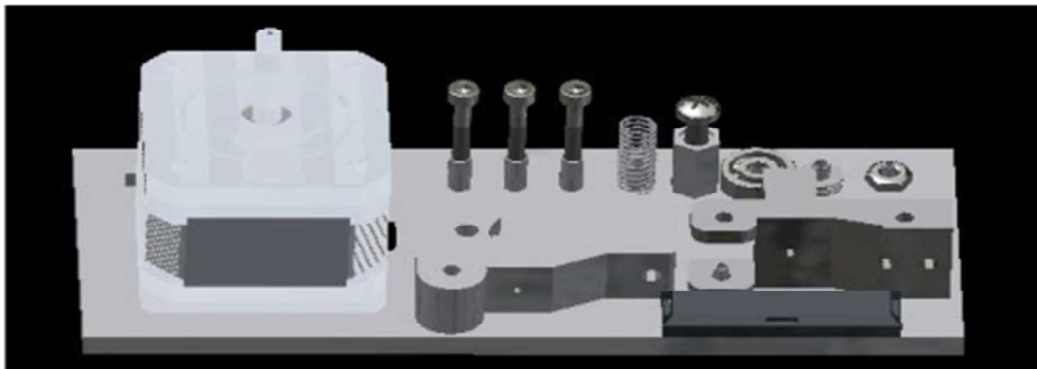
Zidek *et al.*, (2020), desenvolveu esse protótipo no *software* no CAD desenho e *Tecnomatix* para simular os processos da indústria, com base nisso utilizou um CLP para armazenar os dados e controlar todo o sistema em sincronia com Plataforma de Comunicação Aberta (OPC), modelo *Digital Twin* e IoT. Na Figura 17 e 18 demonstra a simulação da peça no ambiente real e virtual, para mapeamento da peça por completo.

Figura 17 – Peça no ambiente real antes simulação 3D.



Fonte: Zidek *et al.*, (2020, p. 5).

Figura 18 – Peça no ambiente virtual da Digital Twin em 3D.



Fonte: Zidek *et al.*, (2020, p. 10).

De acordo com Zidek *et al.*, (2020) a implementação da digitalização *Twin* nos processos da indústria é uma parte de suma importância para utilização dos conceitos da Indústria 4.0, gerando aumento nas produções de médias e pequenas indústrias. Essa aplicação prevê erros de montagens de peças, com base em simulações 3D do sistema em tempo real, com isso essa digitalização de *Twin* podendo ser aplicada na otimização online de processos de montagem de motores elétricos, sem necessidade de interromper toda a produção da indústria.

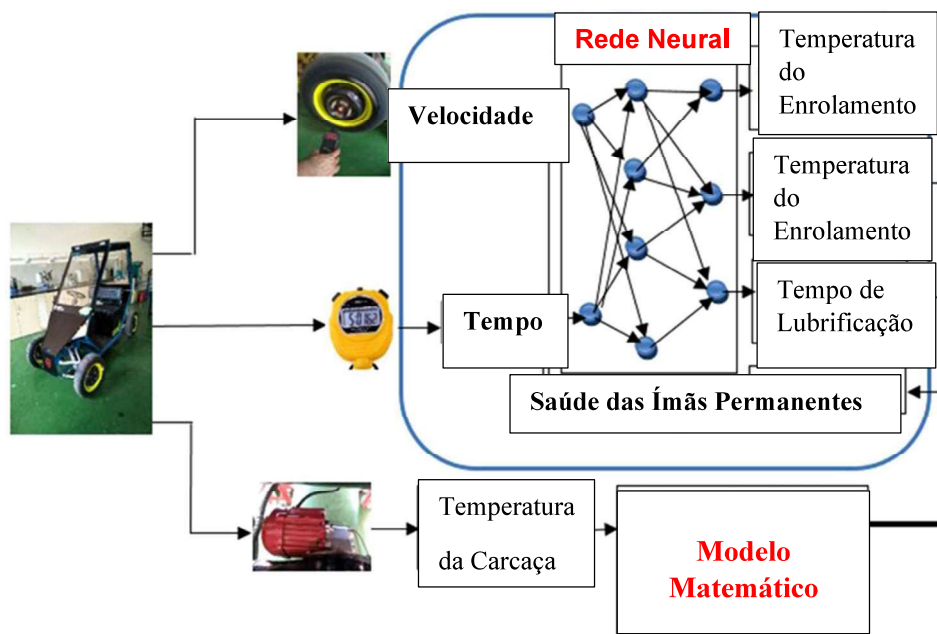
Venkatesan *et al.*, (2019) desenvolveram um sistema de monitoramento para saúde e prognóstico de motor de veículos elétricos utilizando *Digital Twin* no MATLAB/Simulink para monitorar a saúde e o prognóstico de motor síncrono com ímãs permanentes. Portanto a vida útil restante do ímã permanente é calculada usando um sistema de rede neural artificial e lógica

difusa para mapear a temperatura, tempo e distâncias de viagem do veículo elétrico, temperatura do rolamento, tempo para reabastecer lubrificante do rolamento e prever a porcentagem de vida útil e deterioração do fluxo magnéticos da ímãs permanentes do motor elétrico (VENKATESAN *et al.*, 2019).

Esse monitoramento de motor de veículos elétricos foi desenvolvido com duas abordagens, como: monitoramento, prognóstico e desempenho da saúde interna do motor elétrico; e monitoramento remoto do desempenho e saúde do motor, utilizando comunicação em nuvem IoT, pelo provedor do veículo elétrico.

Na Figura 19 apresenta uma coleção de vetores de entrada e saída para treinamento da rede neural artificial, onde foi aplicado *Digital Twin* para treinar a rede neural do sistema para controlar e monitorar a velocidade média.

Figura 19 - Coleção de vetores de entrada-saída para treinamento de redes neural artificial.



Fonte: Adaptado de Venkatesan *et al.*, (2019).

Segundo Venkatesan *et al.*, (2019) os resultados da simulação apresentam que vida útil do ímã permanente e o tempo para reabastecer o rolamento do motor elétrico com lubrificante, satisfaz os resultados teóricos obtidos pela aplicação da *Digital Twin*. Porém, o custo é elevado para investimento dessa aplicação, sendo possível apenas realizar testes e estudos de aperfeiçoamento, portanto podendo ser aplicada na indústria para monitorar e mapear os equipamentos de grande potência, como os motores elétricos.

Outra aplicação de *Digital Twin* é utilizando Filtro de Kalman Extendido (*Extended Kalman Filter - EKF*) para acionamentos de motores elétricos, para realizar estimativa precisas

dos estados de acionamentos de motores de indução trifásicos (MIT), onde o sistema de acionamento de motores EKF é controlado por um campo de rotor sem sensor de velocidade (EBADPOUR *et al.*, 2023). De acordo com Ebadpour *et al.*, (2023) a estimativa do estado de acionamento MIT utilizando o EKF depende das tensões de entrada (alimentação do MIT) que são fornecidos pelos inversores de frequência que suavizam o acionamento do motor.

O objetivo dessa aplicação é utilizar *Digital Twin* e um observador EKF de alto desempenho baseado num modelo prático do inversor de frequência que considera os efeitos do tempo morto e queda de tensão para comutação dos dispositivos. ou seja, permitindo o monitoramento para prever e diagnosticar possíveis problemas com MIT, fornecendo informações de operação, manutenção e desempenho (EBADPOUR *et al.*, 2023). Essa aplicação foi simulada no *software* MATLAB/Simulink para comprovar sua eficiência da *Digital Twin* e do modelo matemático EKF para o sistema de acionamento do MIT.

De acordo com Ebadpour *et al.*, (2023), o modelo de *Digital Twin* proposto melhora consideravelmente o desempenho do MIT que fornece um modelo de inversor prático de acordo com os resultados do EKF. Comparado a outras pesquisas que utilizaram modelo de inversor ideal de baixa precisão, Ebadpour *et al.*, (2023) considerou impactos de atrasos e quedas de tensão dos inversores, ou seja, para torná-lo mais viável para reduzir distorções das correntes.

Para aplicação desse modelo com *Digital Twin* e EKF para monitoramento do sistema de acionamento elétricos do MIT, só poderá ser implementado com futuros projetos de pesquisas, atualmente demanda de testes e experimentos físicos reais, o que aumenta o custo de implementação do projeto.

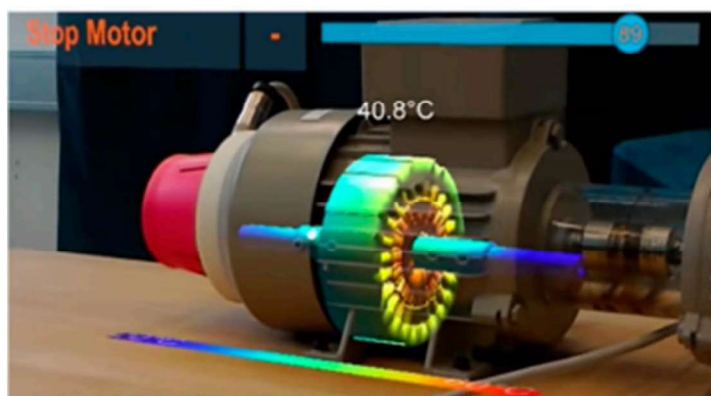
Por fim, Tiwari *et al.*, (2021) apresentou uma pesquisa sobre economia para motores elétricos, contextualizando o seu papel na indústria 4.0, pois o mercado de motores elétricos está em crescimento devido sua ampla utilização nas indústrias e gerando uma alta demanda para gerenciamento e valores elevados dos componentes embutidos motores elétricos.

Essa pesquisa teve como objetivo apresentar uma visão globalizada sobre economia circular, ou seja, realizar estudos para gerar reciclagens de materiais e componentes embutidos nos motores. Segundo Tiwari *et al.*, (2021), sua revisão de literatura concluiu que a ausência de metodologias para utilização de motores elétricos industriais no seu fim de vida, com base nisso apresentou uma estratégia apresentar umas reciclagens para esses componentes utilizando a *Digital Twin* que realiza um mapeamento dos componentes embutidos nos motores elétricos.

Essa tecnologia de mapeamento através da *Digital Twin* é adaptável nos processos de remanufatura⁵ para realizar monitoramentos de avaliação dos componentes e avaliar o desempenho do motor, alguns exemplos de monitoramento de danos são: danos na laminação do núcleo do estator, impacto da queima de laminação e entre outros (TIWARI *et al.*, 2021). Como isso podemos determinar que através desse monitoramento é possível avaliar se os componentes podem ser reutilizados ou não.

De acordo Tiwari *et al.*, (2021) para otimizar e aumentar a produtividade das indústrias é possível aplicar a *Digital Twin* através de um raio x virtual de motores elétricos desenvolvido pela empresa Siemens, que visa monitorar em tempo real as condições de desempenho do motor elétrico. É possível através dessas simulações térmicas obter informações sobre a temperatura da parte interna do motor elétrico, utilizando sensores. Na Figura 20 podemos visualizar um exemplo de simulação térmica no interior do motor para obter informações através da escala de cores que indicam a temperatura, desempenho e estado físico.

Figura 20 - Mapeamento de temperatura do motor.



Fonte: Tiwari *et al.*, (2021, p. 14).

A aplicação dessa tecnologia se torna viável para monitorar os componentes e desempenhos dos motores elétricos, pois gera custo benéficos para as indústrias ao realizar a reciclagens de componentes de motores e elaborando estratégias para realizar manutenções frequentes, evitando a perda total dessas máquinas.

⁵ **Remanufatura:** é um processo que desmonta a peça (máquinas, motores em geral) usada por completo, realizando a restauração de componentes desgastados e colocando em operação novamente, seguindo os padrões do fabricante (FM ROCKET, 2022).

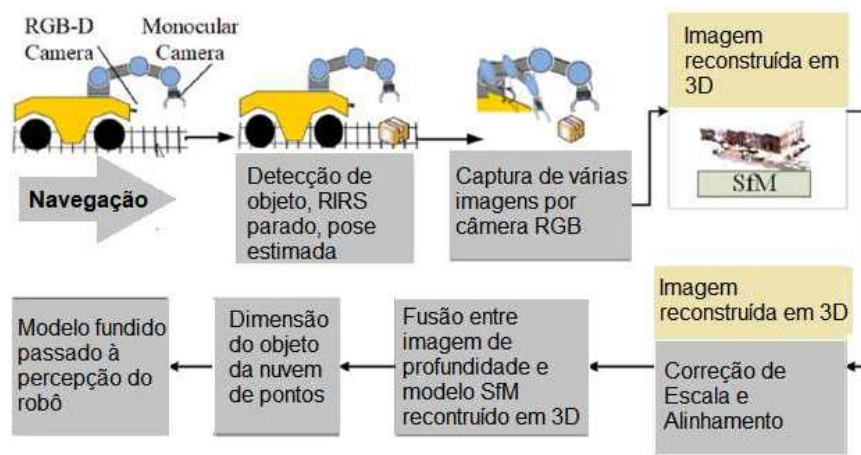
4.3 Aplicação de Robôs Autônomos

Rahman *et al.*, (2023), propôs um método de reconstrução de uma linha férrea utilizando visão robótica autônoma em um veículo adaptado com locomoção nos trilhos, ou seja utilizando um método para realizar avaliação do estado físico ou obstrução das vias férreas através da tecnologia de reconstrução 3D, utilizando uma plataforma móvel de sensoriamento robótico.

O funcionamento desta aplicação consiste na combinação de sensores e uma câmera RGB (*Red, Green and Blue* - Vermelho, Verde e Azul) de sensoriamento que realiza geolocalização e varredura a laser do caminho a ser percorrido pelo veículo autônomo e um braço robótico para retirada de objetos sobre a linha férrea (RAHMAN *et al.*, 2023).

Foram realizados testes no laboratório e na pista realista para comprovação do método proposto, utilizando o veículo autônomo para reconstrução 3D do percurso da linha férrea, como apresentado na Figura 21, onde mostra a arquitetura de funcionamento do protótipo.

Figura 21 – Arquitetura proposta do veículo RIRS.



Fonte: Adaptado de Rahman *et al.*, (2023, p. 4).

De acordo Rahman *et al.*, (2023), as principais atribuições do seu protótipo é: reconstrução 3D automatizada não tripulada por braço robótico móvel; redução de detalhes e dados de reconstrução para fins específicos ou componentes de manutenção que suportam a manutenção de infraestrutura para gerenciamento digital altamente detalhado e orientado para objetivo proposto.

Outra aplicação desenvolvida foi um controle de formação distribuída para grupos de robôs autônomos utilizando algoritmo de consenso, que permite que os robôs tenham autonomia de executar atividades complexas para o homem, como exploração de áreas desconhecidas, resgates entre outras atividades (AFDILA; FAHMI; SANI, 2023). O objetivo

dessa aplicação é o controle e distribuição de um grupo de robôs através de um algoritmo de consenso desenvolvido, que permite que o grupo de robôs mantenha formação para deslocar para um determinado local.

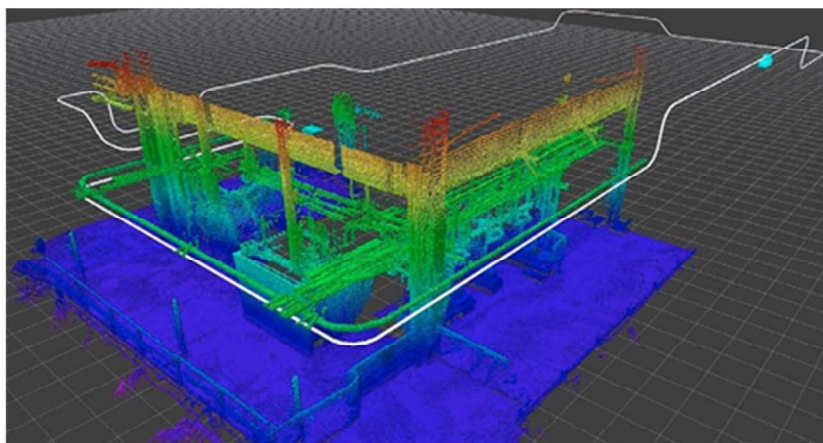
Após realizações de testes, Afdila, Fahmi e Sani (2023), apresentaram uma eficácia do algoritmo por meio de um sistema multi robô, onde foram utilizadas velocidades geradas aleatoriamente e posições iniciais. Os resultados evidenciam que os robôs autônomos são capazes de evitar obstáculos detectados durante o percurso e chegar a um acordo com as variáveis de controle e estabelecer e manter formação necessária.

Carvalho *et al.*, (2017), desenvolveu um robô autônomo guiado por trilhos com objetivo de monitoramento, mapeamento e inspeção de plataformas de petróleo e gás, localizadas em 40 alto mar, ou seja, substituindo o homem de realizar atividades complexas e perigosas em determinado local. O princípio de funcionamento do robô autoguiado consiste em detectar diferentes situações no ambiente, através de sensor de gás, câmeras de vídeo com áudio integrado, câmera de infravermelho e um braço robótico entre outros itens integrados ao robô (CARVALHO *et al.*, 2017).

Portanto, ao se deslocar pelos trilhos instalados ao longo da plataforma de petróleo e gás, os dados obtidos durante o trajeto são enviados para um operador remoto e analisados no local em tempo real através de algoritmo de processamento de sinais, também podendo identificar e corrigir irregularidades como: vazamentos de gás e fluidos em dutos; detecção de fumaça e incêndio; identificando presença de pessoas não autorizadas (CARVALHO *et al.*, 2017).

Na Figura 22, demonstra o percurso do robô autônomo da planta industrial em 3D, onde foram realizados simulações e testes de atividades ao longo da plataforma de petróleo e gás.

Figura 22 – Planta industrial em 3D.



Fonte: Carvalho *et al.*, (2017, p. 5).

Para comprovar a eficácia do protótipo, foram realizados testes em laboratórios para comprovação dos conceitos teóricos e posteriormente realizando testes na planta industrial para comprovar sua funcionalidade e objetivo de aplicação. Carvalho *et al.*, (2017), concluiu que o protótipo está apto para ser aplicado em plantas industriais, após obter êxito nas atividades propostas em simulações em 3D, podendo ser implantados nas plataformas em alto mar nas áreas classificadas de alto risco de trabalho.

Foi desenvolvido um método de melhoramento e precisão da Nuvem de Pontos 3D através de aprendizado de máquina supervisionada para rolamento automatizado de manutenção de estoque aplicado no setor ferroviário. De acordo com Vithanage, Harrison e DeSilva (2018) esse método consiste em introduzir robôs autônomos industriais em trens automáticos (material rodante) da Siemens, utilizando câmera RGB, laser scanner 3D e tempo de locomoção (dados obtidos do sensor) do trem para obter o melhor desempenho da Nuvem de Pontos 3D.

O objetivo é examinar, monitorar e mapear todo equipamento do trem através de imagens 3D, sendo possível diagnosticar e prever futuras manutenções dos trens automáticos, principalmente dos motores (VITHANAGE; HARRISON; DESILVA, 2018). Portanto, o foco desse método é melhorar a precisão geral de Nuvens de Pontos 3D, através de um modelo matemático que avalia o desempenho dos algoritmos de aprendizagem.

Vithanage, Harrison e DeSilva (2019), apresentou uma análise sobre a importância de sistemas robóticos e autônomos focados no setor de manutenção ferroviária, onde foi possível analisar mais de 70 publicações que relacionam os robôs autônomos com manutenções de linhas férreas. Essa análise apresentou uma grande necessidade da atuação de robôs autônomos no setor ferroviário para realização de manutenções, ou seja melhorando a segurança dos

trabalhadores ferroviários e passageiros, aumentando a confiabilidade, eficácia, qualidade do trabalho e evitando despesas com manutenções desnecessárias (VITHANAGE; HARRISON; DESILVA, 2019), pois os robôs autônomos são capazes de realizar monitoramento e emitir alertas sobre a situação do sistema, ou seja prevendo futuras manutenções preventivas.

Vithanage, Harrison e DeSilva (2019, p.13) acreditam que no futuro próximo, haverá robôs colaborativos trabalhando em conjunto com os trabalhadores humanos nas manutenções ferroviárias. Portanto, não podemos esquecer do avanço da tecnologia dos robôs autônomos em outras áreas, principalmente nas aplicações para manutenção e monitoramento de equipamentos elétricos como os motores. Porém, tem poucas aplicações relacionadas a motores elétricos e robôs autônomos, sendo mais direcionadas para manutenções e monitoramento em geral.

Como citados nesse tópico, as aplicações e pesquisas relacionados aos robôs autônomos possuem alto desenvolvimento no setor ferroviário com foco em manutenção e desenvolvimentos de atividades complexas e de risco para o homem. Portanto, essa fusão de tecnologias entre robôs autônomos, IoT e Digital Twin e entre outras podem ser aplicadas não só no setor ferroviário, mas em outros setores com atividades complexas que necessitem de agilidade e precisão, ou seja podendo ter autonomia nas suas atividades, apenas com supervisão do homem.

Capítulo 5

5 CONCLUSÃO

Tendo em vista as aplicações das tecnologias da Indústria 4.0 mencionadas neste trabalho, foi possível analisar e comparar, quais dessas tecnologias estão em ascensão na indústria.

A IoT possui grande desenvolvimento e aceitação na sociedade, sendo muito utilizada para armazenagem de dados e comunicação entre diversos equipamentos, utilizada para diversas aplicações, e é a mais difundida quando comparada às outras tecnologias abordadas neste trabalho. A IoT vem sendo muito utilizada para aplicações na manutenção e monitoramento na indústria, possuindo muitas aplicações diretas para motores, como a comunicação e armazenamento de dados como corrente elétrica, temperatura e estado do motor para realizar análises dos equipamentos.

Portanto, essas aplicações da IoT mencionadas neste trabalho, buscam eficiência energética dos setores industriais para redução de custo. Porém, depende de outras aplicações como *Digital Twin* e entre outras para sua aplicabilidade, ocasionando custos elevados na sua implantação.

Já a *Digital Twin* é utilizada principalmente no monitoramento e análises da saúde dos motores, através de simulações térmicas em 3D que demonstra a saúde do motor. Nos trabalhos citados no tópico *Digital Twin*, essa tecnologia está em ascensão nas indústrias, porém em alguns casos são apenas protótipos que podem ser aplicados futuramente, devido seu alto custo de implementação na indústria.

Na pesquisa sobre os Robôs Autônomos, não foram encontrados trabalhos que desenvolveram aplicações direcionadas a motores elétricos. Nos trabalhos aqui, foi possível analisar que estão ligados diretamente em manutenções e monitoramento e podendo ser aplicadas para manutenção dos motores elétricos, melhorando seu desempenho, principalmente quando se trata de equipamentos alocados em locais remotos e/ou que oferecem riscos à vida.

Com base nas três tecnologias apresentadas neste trabalho, a tecnologia que possui maior avanços em aplicações nos motores é *Digital Twin*, porém a IoT possui o melhor custo-benefício devido sua grande ascensão em diversas áreas tecnológicas. As principais dificuldades para fazer o mapeamento dessas tecnologias foram relacionadas a encontrar

aplicações de robôs autônomos aplicados a motores, principalmente a trabalhos publicados no Brasil. Assim sendo, devido à ausência de trabalhos publicados com essa finalidade, foram usados na revisão trabalhos aplicados no setor ferroviário que podem ser utilizados para o contexto de motores elétricos na indústria 4.0.

Após o mapeamento de aplicações selecionados através de filtros relacionados ao tema para desenvolvimento deste trabalho, conclui-se que existe uma imensa diversidade de aplicações relacionadas aos motores elétricos no contexto da indústria 4.0. Portanto, o principal ponto abordado pelos trabalhos citados, é a importância de buscar soluções, com objetivo de obter informações sobre o estado das máquinas a fim de obter o controle e gerenciamento da indústria, devido ao fato de que as máquinas demandam maior quantidade de manutenção e consumo de energia.

Por fim, as soluções também visam reduzir os custos e desperdício de equipamentos, mão de obra, e custo energético na indústria, buscando a eficiência energética do setor industrial através da implantação dessas tecnologias.

Segundo Piccinini (2023), é previsto uma tendência de crescimento de 18% no mercado de IoT em 2023, resultando em mais de 14,4 bilhões de conexões ativas e prevendo que até 2025 haverá mais de 27 bilhões de dispositivos conectados. Esse aumento projetado ocasiona mudanças no panorama do mercado industrial, e espera-se uma contínua inovação na área de IoT para desenvolvimento de aplicações dos motores elétricos.

Com os avanços tecnológicos, a tendência da *Digital Twin* é alcançar vários setores da indústria e sendo a aplicação mais utilizada para simulações e mapeamentos de equipamentos, pois a *Digital Twin* integra quase todos os pilares da indústria 4.0, sendo possível aplicar com IoT e Robôs autônomos. A tendência para os Robôs Autônomos é continuar evoluindo para alcançar variados setores para desenvolver atividades complexas e perigosas para homem. E aumentando o desempenho e eficiência dos trabalhos em conjuntos com os pilares da indústria 4.0.

Após esse mapeamento de tecnologias aplicadas em motores elétricos no contexto da indústria 4.0, é possível realizar pesquisas futuras de novas aplicações, sugerindo a contextualização individual e aprofundada de cada tecnologia, onde possa apresentar seus resultados das vantagens e dificuldades obtidas para realizar análise dessas novas tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFDILA, R.; FAHMI, F.; SANI, A. Distributed formation control for groups of mobile robots using consensus algorithm. **Bulletin of Electrical Engineering and Informatics**, v. 12, n. 4, p. 2095-2104, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.11591/eei.v12i4.3869>>. Acesso em: 28 de abril de 2023.

AGÊNCIA BRASIL. **CNI: alta na produção e no emprego mostra aquecimento da indústria**. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-08/cni-alta-na-producao-e-no-emprego-mostra-aquecimento-da-industria>>. Acesso em: 22 de novembro de 2022.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL, ABDI. **Inovação, Manufatura Avançada e o Futuro da Indústria: uma Contribuição ao Debate sobre as Políticas de Desenvolvimento Produtivo**. Brasília, 2018.

ALBERTIN, M. *et al.* **Principais inovações tecnológicas da indústria e suas aplicações e implicações na manufatura**. 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/60805>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

ASHTON, K. **That “Internet of Things” Thing**. Publicado no **RFID Journal**, v. 22, n. 7, pág. 97-114, 2009.

BAKER, B. Digi.Key. **O conceito de gêmeo digital e como isto funciona**, 2021. Disponível em: <<https://www.digikey.com.br/pt/articles/the-digital-twin-concept-and-how-it-works>>. Acesso em: 19 de novembro de 2022.

BARRO, B. B. **O Que São Frameworks e Quais os Mais Utilizados**. Disponível em: <<https://www.hostinger.com.br/tutoriais/frameworks>>. Acesso em: 19 de novembro de 2022.

BEKEY, G. A. **Robôs autônomos: da inspiração biológica à implementação e controle**. Imprensa do MIT, 2005.

BERTOLETI, P. **Envie dados de temperatura e umidade relativa do ar para o ThingSpeak com o ESP8266.FilipeFlop**, 13 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/esp8266-com-thingspeak>>. Acesso em: 9 de novembro de 2022.

CARVALHO, G. P.S. *et al.* The DORIS offshore robot: recent developments and real-world demonstration results. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 11215-11220, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896317327635>>. Acesso em: 28 de abril de 2023.

CITISYSTEMS. **Motor CC e suas Partes**. nov. 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/wp-content/uploads/2016/11/partes-motor-cc.png>>. Acesso em: 23 de julho de 2022.

COLOMBO, J. F.; LUCCA FILHO, J. INTERNET DAS COISAS (IOT) E INDÚSTRIA 4.0: revolucionando o mundo dos negócios. **Revista Interface Tecnológica, [S. l.]**, v. 15, n. 2, p. 72–85, 2018. DOI: 10.31510/infa.v15i2.496. Disponível em:

<<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/496>>. Acesso em: 9 de outubro de 2022.

CRUZ, A. M.; BERWANGER, D. **Sistema Automatizado para Testes em Motores Elétricos de Indução Trifásicos de Baixa Potência**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

DATA SCIENCE. **Interação pela IoT, 2019**. Disponível em: <<https://datascience.eu/wp-content/uploads/2019/12/iStock-1164502150-978x652.jpg>>. Acesso em: 9 de outubro de 2022.

DEL CARMEN, G. Forbes tech: **Robôs Autônomos**. 2021. Disponível em: <https://forbes.com.br/wp-content/uploads/2021/09/ForbesTech_robo-humanoide_Andriy-Onufriyenko_Getty-Images.png>. Acesso em: 20 de novembro de 2022.

DIAS, R. R. F. **Internet das coisas sem mistérios: uma nova inteligência para os negócios**. São Paulo: Netpress Books, 2016.

DIMENSIONAL A SONEPAR COMPANY. Empresa Brasileira de Venda e Distribuição de Materiais Elétricos. Artigo: **Motores de Corrente Contínua e de Corrente Alternada: entenda a diferença**. 17 mar. 2020. Disponível em: <<https://blog.dimensional.com.br/motores-corrente-continua/>>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

EBADPOUR, M. *et al.* **Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF**. Sensors, v. 23, n. 4, p. 2006, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/23/4/2006>>. Acesso em: 10 de abril de 2023.

ENGENHARIA-PRESYS. **Indústria 4.0**. 2022. Disponível em: <<http://www.presys.com.br/blog/industria-4.0>>. Acesso em: 26 de agosto de 2022.

ENGRENAR JUNIOR. Automação industrial: o que é e como é realizada? - Engrenar Jr. - UFSCar. Engrenar Jr. - **Empresa Júnior de Engenharia Mecânica da UFSCar**. Engrenar Jr. - Empresa Júnior da UFSCar, 17 jul. 2020. Disponível em: <<https://engrenarjr.com.br/blog/automação-industrial>>. Acesso em: 24 de julho de 2022.

EPE, Empresa de pesquisa Energética. **BEN 2018 - Balanço Energético Nacional de 2018**. Ano base 2017. Rio de Janeiro, Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 2 de novembro de 2022.

EVANS, D. A Internet das Coisas. **San José: Cisco (IBSG)**, abr. 2011.

FERREIRA, A. A.; REIS, A. C. F.; PEREIRA, M. I. *Gestão empresarial: de Taylor aos nossos dias: evolução e tendências da moderna administração de empresas*. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

FIRJAN. **Indústria 4.0: Panorama da Inovação**. 2016. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8A555B47FF01557D8802C639A4>>. Acesso em: 25 de julho de 2022.

FRONTONI, E. *et al.* Cyber physical systems for industry 4.0: Towards real time virtual reality in smart manufacturing. In: **International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics**. Springer, Cham, 2018. p. 422-434.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GOOGLE ACADÊMICO, 2023. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/?hl=pt>. Acesso em: 12 de outubro de 2023.

HEYMANN, G. **O Motor elétrico**. Revista Super Interessante, editora ABRIL. 31 de out. de 2016. Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/o-motor-eletrico/>. Acesso em: 18 de julho de 2022.

ILLUSTRATION PRIZE. **Diferença entre o motor CA e CC**. 2020. Disponível em: <https://illustrationprize.com/pt/90-difference-between-ac-and-dc-motor.html>. Acesso em: 6 de junho de 2023.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industry 4.0**. Acatech, p. 13-78, 2013.

LIN, W. D. *et al.* Integrated cyber physical simulation modelling environment for manufacturing 4.0. In: **2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. IEEE, 2018. p. 1861-1865. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8607696> >. Acesso em: 15 de março de 2023.

LUCIANO-ABECOM, B. **Motor elétrico: principais tipos e como funcionam - ABECOM SKF**. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/tipos-de-motor-eletrico>. Acesso em: 15 de julho de 2022.

MAGALHÃES, R.; VENDRAMINI, A. **Políticas Públicas: Os Impactos da Quarta Revolução Industrial**. Mar. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.12660/gvexec.v17n1.2018.74093>. Acesso em: 20 de julho de 2022.

MAUSBACH, L. B. **Método para monitoramento de motores de corrente contínua integrados a redes de IoT**. 2019.

MEDEIROS, S. M. de; ROCHA, S. M. M. Considerações sobre a terceira revolução industrial e a força de trabalho em saúde em Natal. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 9, p. 399-409, 2004. Disponível em: www.scielo.br/j/csc/a/Cwp5Sxn7vqJWKLdcGqqqJ7D/abstract/?lang=pt. Acesso em: 9 de janeiro de 2023.

MOREIRA, F. V.; NASCIMENTO, G. G. **Proposta de um Sistema Controlador de Demanda Industrial baseado em IoT**. Instituto Nacional de Telecomunicações-INATEL, Minas Gerais, p. 11, 2020.

MUSEU WEG DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **A história do motor elétrico que você precisa conhecer**. 06 de jan. 2018. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/a-historia-do-motor-eletrico/>. Acesso em: 04 de julho de 2022.

NASCIMENTO JUNIOR, G. C. **Máquinas Elétricas: teoria e ensaios**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2011. 266 p.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de metodologia científica: projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses**. 2. ed. São Paulo: Pioneira, 1999.

PASQUINI, N. C. As Revoluções Industriais: Uma Abordagem Conceitual. **Revista Tecnológica Fatec Americana**, v.8, n.1, p. 29-44, ago. 2020. Disponível em <<https://www.fatec.edu.br/revista/index.php/RTecFatecAM/article/view/235>>. Acesso em: 22 de junho de 2022.

PETRUZELLA, F. **Motores elétricos e acionamentos**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013. 366 p.

PICCININI, M. **Tendências de IoT para 2023: o que você precisa saber**. **Sigmais**, 20 fev. 2023. Disponível em: <<https://sigmais.com.br/tendencias-de-iot-para-2023-o-que-voce-precisa-saber/>>. Acesso em: 6 de junho de 2023.

QUERO, R.; BEHRENS, F.; FABRICIO, M. A. **Técnicas de Análise de Dados de uma Linha de Produção Monitorados via IoT**. 2018.

RASHEED, A.; SAN, O.; KVAMSDAL, T. **Gêmeo digital: valores, desafios e facilitadores de uma perspectiva de modelagem**. *Ieee Access*, v. 8, p. 21980-22012, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8972429>>. Acesso em: 30 de março de 2023.

RAHMAN, M. *et al.* A railway track reconstruction method using robotic vision on a mobile manipulator: A proposed strategy. **Computers in Industry**, v. 148, p. 103900, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361523000507>>. Acesso em: 28 de abril de 2023.

REVOLUÇÃO INDUSTRIAL INGLESA. 1999. Disponível em: <<https://www.toda-materia.com.br/revolucao-industrial/>>. Acesso em: 18 de junho de 2022.

RIOS, A. A. *et al.* **Aplicação de internet das coisas no monitoramento de corrente, tensão e temperatura em motor de indução trifásico**. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26442>>. Acesso em: 29 de outubro de 2022.

ROCHA, F. P. **Estudo da Frenagem Regenerativa Para Motores Elétricos de Indução Trifásicos**. 2019. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

ROCKET, FM. Site Proteauto Brasil. **Remanufaturado e recondicionado: qual a diferença?** Disponível em: <<https://blog.proteautobrasil.com.br/remanufaturado-e-recondicionado-qual-a-diferenca/>>. Acesso em: 19 de novembro de 2022.

RÜBMANN, M. *et al.* **Future of Productivity and Growth in Manufacturing**. Boston Consulting, 9. April, 2015. Disponível em:

<https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries>. Acesso em: 18 de novembro de 2022.

SACOMANO, J. B. *et al.* **INDÚSTRIA 4.0: Conceitos e Fundamentos**. Blucher. São Paulo, 2018.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL, SENAI. PORTAL DA INDÚSTRIA. **Indústria 4.0: Entenda seus Conceitos e fundamentos**. 2020. Disponível em: <portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

SENS, M. **Avanços tecnológicos nos motores elétricos**. WEG em Revista. p.11-13, jan. 2001. Disponível em: <http://www.fceletrotecnica.com.br/files/weg_evolucao_dos_motores.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2022.

SINGER, T. **Tudo Conectado: Conceitos e Representações da Internet das Coisas**. Simpósio em Tecnologia Digitais e Sociabilidade – Práticas Internacionais em Rede, 2012.

SIGGA TECHNOLOGIES. Os 9 Pilares da Indústria 4.0 - **Você conhece todos eles?**. 2021. Disponível em: <<https://www.sigga.com/pt-br/blog/os-pilares-da-industria-4-0>>. Acesso em: 28 de abril de 2023.

SOUZA, V. S. *et al.* Digital Twin: **Uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em comissionamento virtual utilizando motor gráfico Unity3D**. 2021. Disponível em: <<https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/8533>>. Acesso em: 15 de novembro de 2022.

SCHLUSE, M.; ROSSMANN, J. **Da simulação aos gêmeos digitais experimentais: desenvolvimento baseado em simulação e operação de sistemas técnicos complexos**. In: 2016 IEEE Simpósio Internacional de Engenharia de Sistemas (ISSE) . IEEE, 2016. pág. 1-6. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7753162>>. Acesso em: 30 de março de 2023.

SHAFTO, M. *et al.* NASA Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. [S.l.]: **National Aeronautics and Space Administration**, 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280310295_Modeling_Simulation_Information_Technology_and_Processing_Roadmap>. Acesso em: 05 de março de 2023.

TEIXEIRA, R. S. D. **Perda de Eficiência Energética Causada por Motores Elétricos Recondicionados no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33150/33150.PDF>>. Acesso em: 25 de maio de 2023.

TIWARI, D. *et al.* **A review of circular economy research for electric motors and the role of industry 4.0 technologies**. Sustainability, v. 13, n. 17, p. 9668, 2021.

VENÂNCIO, A. L. A. C.; BREZINSKI, G. L. **Sistema de avaliação de maturidade Industrial baseando-se nos conceitos da indústria 4.0**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2017.

VENKATESAN, S. *et al.* Health monitoring and prognosis of electric vehicle motor using intelligent-digital twin. **IET Electric Power Applications**, v. 13, n. 9, p. 1328-1335, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5732> >. Acesso em: 12 de abril de 2023.

VIEIRA, D. D. **Framework IOT para análise do desempenho de motores elétricos trifásicos**. 2021.

VITHANAGE, R. K.W; HARRISON, C. S.; DESILVA, A. K.M. Enhance 3D point cloud accuracy through supervised machine learning for automated rolling stock maintenance: A railway sector case study. In: **2018 International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE)**. IEEE, 2018. p. 242-246. Disponível em: < <https://doi.org/10.1109/iCCECOME.2018.8658788> >. Acesso em: 28 de abril de 2023

VITHANAGE, R. K.W.; HARRISON, C. S.; DESILVA, A. K.M. Importance and applications of robotic and autonomous systems (RAS) in railway maintenance sector: A review. **Computers**, v. 8, n. 3, p. 56, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/computers8030056>>. Acesso em: 28 de abril de 2023

WEG. **Guia de Especificação para Motores Elétricos**. p.6. Jaraguá do Sul, Weg. jan. 2021.

ZIDEK, K. *et al.* **Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept**. Sustainability, v. 12, n. 9, p. 3658, 2020.