

Volume 19, n.1, 2025



REVISTA DE CONHECIMENTO INTERATIVO

**SEÇÃO TEMÁTICA:
AUTOMAÇÃO IND.**

Editora UniSenai Pr
www.unisenaipr.com
ISSN 1809-3442



SUMÁRIO

Seção Temática: Automação Ind.

Seção Temática

[ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE APLICADAS A UMA PLANTA DIDÁTICA DE CONTROLE DE NÍVEL DE BAIXO CUSTO](#) [Download](#)

Bruno Leandro Galvão Costa 1-24

[MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO TÉRMICA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO SENSORIAMENTO DE TEMPERATURA NO ESTATOR E REDES NEURAIS](#) [Download](#)

Alisson Antonio dos Santos, Rayssa Milena Castro Correia, Renato Kazuo Miyamoto 25-67

[SISTEMA DE DETECÇÃO DE ATAQUE EM REDES INDUSTRIAIS QUE UTILIZAM PROTOCOLO PROFINET](#) [Download](#)

Oswaldo Felipe da Silva Costa, Wesley Candido da Silva 68-96

[ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTE ELÉTRICA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO](#) [Download](#)

Luis Felipe da Silva Maciel, Renato Kazuo Miyamoto 97-124

Artigos

[APLICAÇÃO DE REGRAS PARA TRANSFORMAÇÃO DE MODELO INDEPENDENTE DE COMPUTAÇÃO \(CIM\) PARA MODELO INDEPENDENTE DE PLATAFORMA \(PIM\): um Estudo de Caso aplicado na Indústria Vidraceira](#) [Download](#)

Flávio Henrique de Oliveira, Anthon Pedrollo Hax, Maria Sophia Pardinho da Silva, Pedro Delgado Henriques, Victor Shoiti Satake 125-140

[REDUÇÃO DE DIMENSIONALIDADE, RANQUEAMENTO E PREDIÇÃO DE CPUs E GPUS COM CIÊNCIA DE DADOS E MACHINE LEARNING](#) [Download](#)

Davi Coene Rosa, Eduardo Peres Mosena, Tiago Rafael Wengrat, Thiago Schaedler Uhlmann 141-176



<u>ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUÇÃO EM LINHAS PRODUTIVAS DE UMA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA</u>	Download
<i>Wagner de Lima Santos, Renato Miyamoto</i>	177-211
<u>EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA SUSTENTÁVEL: reutilização de microcontroladores ARM obsoletos</u>	Download
<i>Gabriel Lucas Paulino, Leonardo Borges dos Santos, Rayane Depetriz, Rayssa Milena Castro Correia, Wesley Candido da Silva</i>	212-232
<u>APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS PARA ESTIMADORES DE VELOCIDADE SENSORLESS EM MOTORES CC NA INDÚSTRIA 4.0</u>	Download
<i>Danilo Ferreira Fontoura, Wesley Candido da Silva, Renato Miyamoto</i>	233-260
<u>DESEMPENHO DE MÉTODOS SIMPLES DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA EM LIGAS METÁLICAS AUTOMOTIVAS</u>	Download
<i>João Vitor Chendynski, Adriana Giseli Leite Carvalho, Daniel Almeida Colombo</i>	261-269
<u>A IMPORTÂNCIA DA EDUCAÇÃO FÍSICA NA EDUCAÇÃO EM TEMPO INTEGRAL (ETI) E O IMPACTO NO DESENVOLVIMENTO INTEGRAL DO ALUNO</u>	Download
<i>Aline Maiane Fagundes, Cristiane Menino, Gabrieli Machado, Letícia Fiuza dos Santos, Luana Fernanda Campanharo, Felipe Augusto Fernandes Borges</i>	270-278
<u>MODA, SUSTENTABILIDADE E ENSINO SUPERIOR: conexões entre formação acadêmica e demandas do mercado</u>	Download
<i>Jonas Eduardo Rocha</i>	279-297
<u>CRIATIVIDADE E SUSTENTABILIDADE NO ENSINO DE MODA: reaproveitamento de tecidos de balões aposentados para desenvolvimento de projetos de coleção</u>	Download
<i>Jonas Eduardo Rocha</i>	298-318
<u>SHREDDER DESAGUADOR</u>	Download
<i>Caroline Damaceno, Lucas Fernando Alves, Angelo Rodrigo Ruth</i>	319-336



ESTRATÉGIAS DE CONTROLE INTELIGENTE APLICADAS A UMA PLANTA DIDÁTICA DE CONTROLE DE NÍVEL DE BAIXO CUSTO

Bruno Leandro Galvão Costa*

RESUMO

Este artigo ilustra a aplicação de abordagens de controle inteligente em uma planta didática de controle de nível construída com dispositivos de baixo custo, neste caso, utilizando componentes relacionados à plataforma eletrônica Arduino Uno. Detalhes construtivos deste recurso didático de ensino são comentados ao longo do trabalho. As estratégias de controle inteligente consideradas para a análise no sistema proposto baseiam-se nas redes neurais artificiais e lógica fuzzy, sendo seus desempenhos comparados com o de um controlador proporcional-integrativo clássico. Resultados de ensaios experimentais foram obtidos e são ilustrados no decorrer do trabalho visando evidenciar as vantagens, em termos de controle, de utilização das estratégias inteligentes em relação à convencional.

Palavras-chave: Arduino Uno. Controle PI. Lógica Fuzzy. Redes Neurais Artificiais. Sistema de Controle de Nível.

INTELLIGENT CONTROL STRATEGIES APPLIED TO A LOW COST LEVEL CONTROL DIDACTIC PLANT

ABSTRACT

This paper illustrates the application of intelligent control approaches in a didactic level control plant built with low-cost devices, in this case, using components related to the Arduino Uno electronic platform. Constructive details of this teaching didactic resource are discussed throughout the article. The intelligent control strategies considered for the analysis of the proposed system are based on artificial neural networks and fuzzy logic, and their performances are compared with that of a classical proportional-integrative controller. Results of experimental test were obtained and are illustrated in the course of the work in order to highlight the advantages, in terms of control, of using intelligent strategies in relation to the conventional one.

Key-words: Arduino Uno. PI Control. Fuzzy Logic. Artificial Neural Networks. Level Control System.

* Autor correspondente (e-mail): brunolgcosta@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, nos ambientes industriais, muitas estratégias de controle têm sido utilizadas, visando melhorar o desempenho dos processos envolvidos, bem como aliar questões relacionadas à maximização de produção e minimização de custos. Dentre estas estratégias de controle, os controladores PI/PID são certamente uma das melhores metodologias aplicadas ao controle de processos, principalmente por conta de sua simplicidade de implementação (KOSÁK, 2014).

O projeto de um controlador PI/PID para um dado sistema consiste na definição de alguns parâmetros que caracterizem a dinâmica do processo em questão. Inicialmente, um método de identificação deve ser empregado para a modelagem matemática do sistema de controle. Sendo assim, na literatura podem ser encontrados vários métodos de identificação tais como os de Broida (HAMITI, 1996), Ziegler/Nichols, Sundaresan/Krishnaswamy e de Smith (COELHO; COELHO, 2004).

Após este procedimento é necessário efetuar a sintonia do controlador, ou seja, ajustar seus respectivos ganhos: proporcional, integrativo e derivativo. Dessa forma os métodos de sintonia podem ser empregados, sendo baseados i) em curvas de resposta ao degrau (ASTROM; HÄGGLUND, 1995), ii) no lugar das raízes (OGATA, 2010) e iii) na resposta em frequência (ANGÉLICO; CAMPANHOL; SILVA, 2014).

Apesar da enorme aplicabilidade dos controladores PI/PID, em algumas situações a obtenção de modelos matemáticos de processos de controle pode ser bastante difícil, devido a inúmeros motivos dentre eles às suas características não-lineares. Devido a isso, muitas estratégias alternativas de controle, e que não exigem o conhecimento do modelo do sistema, têm surgido nas últimas décadas, podendo resultar em desempenhos superiores àqueles dos controladores PI/PID. Dentre elas podem ser destacadas àquelas baseadas em sistemas inteligentes (ou inteligência artificial), neste caso, sistemas fuzzy (GOMIDE; GUDWIN, 1994) e redes neurais artificiais (RNAs) (SILVA, 2016).

A lógica fuzzy, também conhecida como lógica nebulosa ou difusa, é uma metodologia computacional que busca desenvolver raciocínios muito próximos aos

dos seres humanos, visando a solução de problemas cujas informações sejam imprecisas ou incertas. As RNAs, por sua vez, são algoritmos que se baseiam no comportamento do cérebro humano, o qual possui neurônios, elementos sensoriais dispostos em uma vasta rede cuja função é a de propagação de impulsos nervosos. No ambiente computacional as RNAs apresentam capacidade de aprendizado e generalização, realizados por meio de informações que lhes são fornecidas.

Vários trabalhos ilustram a aplicação de sistemas inteligentes em processos de controle. Almeida (2014) descreve a aplicação de topologias de controladores fuzzy para um processo multivariável. Por sua vez, o artigo de Andrade, Agulhari, Goedtel (2015) ilustra a implementação de um PI-neural para um sistema de controle de vazão. Já em Bertachi et al. (2013), controladores neurais foram desenvolvidos para o controle de uma malha multivariável de nível e temperatura. No trabalho de Freire Júnior, Vargas, Goedtel (2013) um PI-neural foi projetado para o controle de um servomecanismo.

Este artigo busca aplicar estratégias de inteligência artificial em sistemas de controle, neste caso, como controladores baseados nos conceitos da lógica fuzzy e das RNAs, sendo analisadas em uma planta didática de controle de nível desenvolvida com equipamentos de baixo custo e controlada via plataforma Arduino Uno. Tal sistema de controle foi desenvolvido com o objetivo de poder auxiliar ambientes de ensino e aprendizagem acadêmicos, de modo a facilitar o entendimento sobre aspectos relacionados à área de controle. Neste contexto, controladores fuzzy e neural foram implementados e seus comportamentos foram analisados com o de um controlador PI convencional, sendo apresentados no decorrer do trabalho. Testes experimentais foram coletados e são mostrados de modo a evidenciar as principais contribuições em termos de controle de tais estratégias inteligentes.

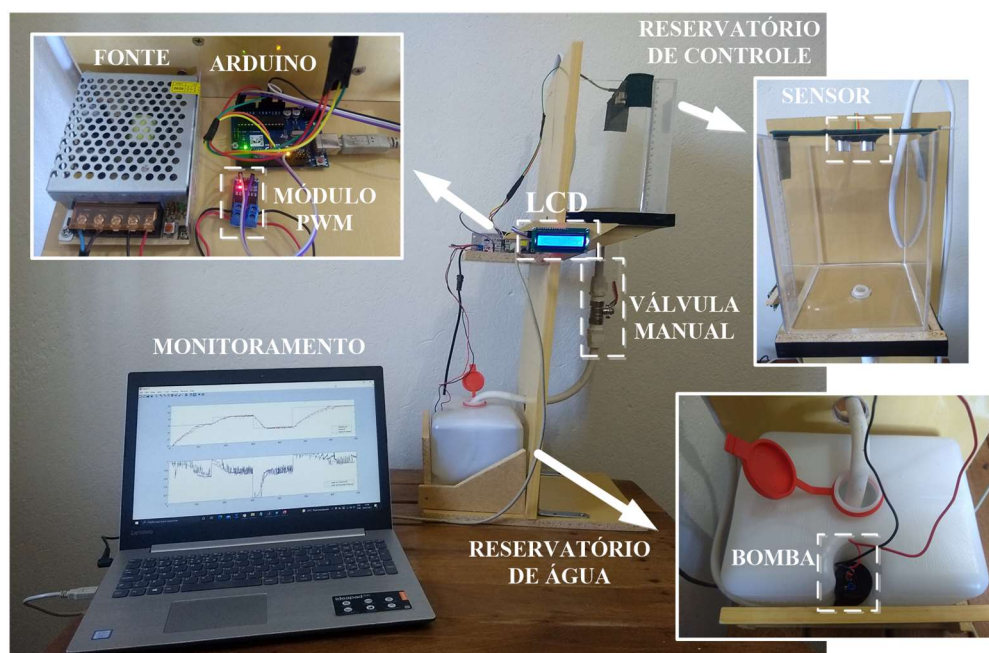
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Planta didática de controle de nível

A Figura 1 ilustra a planta didática de controle de nível desenvolvida neste artigo, constituída principalmente pelos seguintes componentes de fácil acesso:

- Plataforma de desenvolvimento Arduino;
- Sensor de nível ultrassônico HC-SR04;
- Módulo PWM D4184 30A/36V 400W;
- Fonte de tensão 5A/12V;
- Display LCD 16x2 (com adaptador I2C);
- Bomba de água 4A/12V;
- Válvula manual; e
- Reservatórios de água e de controle, acoplados com engates de PVC e mangueira para envio/recebimento de água.

Figura 1 – Planta didática de controle de nível



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)



Esta planta utiliza a plataforma de desenvolvimento Arduino Uno para a implementação dos controladores que serão analisados ao longo do trabalho, a qual foi adotada no projeto devido ao fato de ser uma plataforma mundialmente difundida e popularizada, tanto nos ambientes acadêmicos quanto nos comerciais e industriais, com grande facilidade de utilização. Dentre as principais características do Arduino Uno podem ser destacadas (MCROBERTS, 2011):

- Estrutura composta por um microprocessador Atmel AVR, microcontrolador ATmega328P e regulador de tensão linear de 5V (padrão de operação);
- 6 pinos de entrada analógica (A0 a A5) (10 bits), 14 pinos de entradas/saídas digitais (0 a 13), sendo 6 destes pinos do tipo PWM (8 bits);
- Corrente CC por pino de entrada/saída igual a 40mA;
- *Clock* interno a cristal com 16 MHz;
- Possibilidade de desenvolvimento de algoritmos baseados em linguagem C utilizando o IDE Arduino, ambiente gratuito e fornecido pelo fabricante;
- Porta USB para comunicação de dados com computadores.

Para realizar as medições de nível no reservatório de controle, optou-se pelo módulo ultrassônico HC-SR04, um dispositivo de sensoriamento de baixo custo e de fácil utilização. Como dispositivo atuador do sistema de nível optou pela utilização de uma bomba de água 12V, acoplada em um reservatório de água (ambos utilizados em limpadores para-brisas de automóveis), sendo operada nos experimentos com uma tensão máxima de 6V para conservar sua vida útil. Devido ao seu consumo de corrente ser de aproximadamente 4A, optou-se pela utilização do módulo PWM D4184, também de baixo custo, que permite operações até 30A. Acoplado ao módulo PWM está uma fonte de tensão 5A/12V, necessária para a alimentação da bomba, de acordo com o nível PWM enviado pelo Arduino. Um pequeno display LCD é considerado para o monitoramento do sistema. Por fim, uma válvula manual é acoplada ao sistema de nível possibilitando possíveis distúrbios.

Vale a pena destacar que para o monitoramento em tempo real do sistema de controle de nível, optou-se por utilizar o software MATLAB, o qual possibilita a criação de algoritmos de controle bastante sofisticados. Neste caso, utiliza-se a comunicação serial como interface para a troca de dados entre a planta de controle e o software.

2.2 Abordagem para o projeto de controladores PI/PID

2.2.1 Identificação de processos

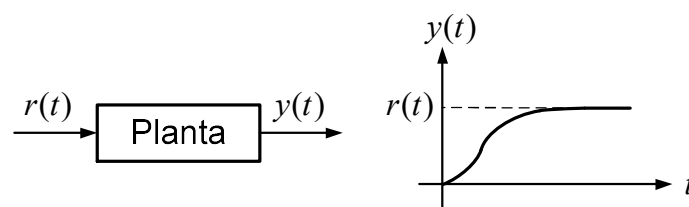
A identificação de um sistema consiste, basicamente, na determinação de um modelo matemático com base em informações do sistema a ser controlado (COELHO; COELHO, 2004). O objetivo principal desta etapa é obter uma função de transferência (FT) que caracterize da melhor forma possível a dinâmica de um determinado sistema de controle, de modo a auxiliar a etapa de sintonia do controlador a ser empregado, ou seja, ajuste de seus ganhos ou parâmetros.

Essa função, em geral, é obtida no domínio do tempo, sendo representada com o auxílio da transformada de Laplace. Alguns processos industriais, tais como sistemas de controle de nível, temperatura, vazão ou pressão, por exemplo, muitas vezes podem ser representados por FTs de primeira ou de segunda ordem (OGATA, 2010). Neste trabalho, a planta de controle de nível será modelada como um sistema de primeira ordem, cuja FT é dada pela equação (1):

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

onde K é o ganho em regime permanente, L o atraso de transporte e T a constante de tempo do sistema. Para a obtenção desta FT alguns métodos de identificação de sistemas baseados na resposta do processo ao degrau podem ser considerados. Tal resposta, como ilustrado na Figura 2 por $y(t)$, assume um formato em “S” o que facilita a identificação do processo por meio de tais métodos, que já fornecem equações características para a determinação dos parâmetros K , L e T da equação (1).

Figura 2 – Resposta de um processo ao degrau unitário

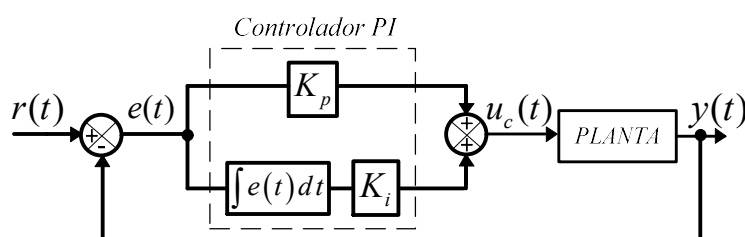


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

2.2.2 Sintonia de controladores PI/PID

Após a etapa de identificação do sistema, métodos de sintonia podem ser aplicados para projetar controladores PI/PID. Neste trabalho, considera-se o projeto de um controlador PI para a planta de nível, cuja estrutura é ilustrada na Figura 3, ação de controle $u_c(t)$ e FT $C(s)$ dadas, respectivamente, pelas equações (2) e (3):

Figura 3 – Estrutura do controlador PI



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

$$u_c(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

onde K_p e K_i são os ganhos proporcional e integrativo, respectivamente. Por sua vez, o erro atuante do sistema $e(t)$ é definido como a diferença entre os sinais de referência $r(t)$ e da saída do sistema $y(t)$ (que neste trabalho é o nível de água). A escolha dos parâmetros K_p e K_i geralmente atende a requisitos de desempenho, tais como máximo sobressinal, tempos de subida e de acomodação, por exemplo. Uma das técnicas empregadas no ambiente industrial é a tentativa e erro (do inglês *trial-and-error*), baseada em chutes empíricos para os ganhos. No entanto, esta técnica apresenta problemas: necessidade de inúmeros testes, às vezes exaustivos, e gasto de tempo.

Para solucionar este tipo de problema, métodos de sintonia foram desenvolvidos para uma melhor determinação de parâmetros, tais como os métodos i) baseados na resposta ao degrau (COELHO; COELHO, 2004), ii) baseados na análise do lugar das raízes (OGATA, 2010) e iii) baseados na resposta em frequência, sendo este último considerado neste artigo para o ajuste dos ganhos do controlador PI, cuja metodologia de projeto é detalhada em Angélico, Campanhol, Silva (2014). Além do conhecimento da FT do sistema no qual deseja-se controlar, dois parâmetros de projeto devem ser definidos: i) a frequência de cruzamento de ganho (ω_G) e ii) a margem de fase desejada (γ), estipulados pelo projetista (ou usuário).

2.2.3 Discretização do controlador

Para o desenvolvimento de sistemas de controle em simulações computacionais são utilizados modelos matemáticos baseados em equações diferenciais. Contudo, para a implementação física destes sistemas em microcontroladores, principalmente o controlador PI, devem ser consideradas equações de diferenças, dependentes do tempo de amostragem (T_s), uma variável importante a ser considerada em implementações de hardware digital.

Tais equações são obtidas a partir de métodos de discretização, equações que relacionam o tempo contínuo (s) com o tempo discreto (z), sendo geralmente considerados os métodos de aproximação *Backward*, *Forward* e *Trapezoidal* (ou *Tustin*), sendo este último o considerado para o presente trabalho, onde a variável de Laplace é definida como $s = (2/T_s)[z-1]/[z+1]$. Substituindo esta relação na FT da equação (3), e aplicando os conceitos relacionados à transformada z , obtém-se a equação de diferenças para a ação de controle do PI, dada pela equação (4):

$$u_c[k] = ae[k] + abe[k-1] + u_c[k-1]$$

$$a = \frac{2K_p + T_s K_i}{2} \quad \therefore \quad b = \frac{T_s K_i - 2K_p}{2K_p + T_s K_i} \quad (4)$$

em que as variáveis k e $k-1$ representam uma amostra atual e uma anterior no sistema em tempo discreto, respectivamente.

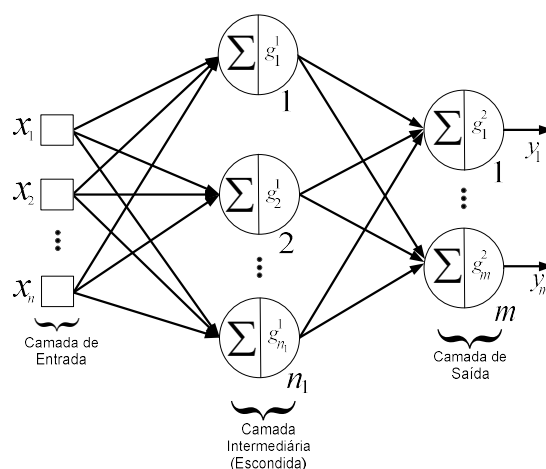
2.3 Abordagens baseadas em inteligência artificial

2.3.1 Redes neurais artificiais

As RNAs, nas últimas décadas, vêm se tornando uma abordagem amplamente estudada em diversas áreas do conhecimento, devido as suas potencialidades, que as tornam muito atrativas para inúmeras aplicações. Estas redes são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos, que possuem capacidade de aquisição e manutenção de conhecimento/aprendizado (SILVA, 2016).

Uma das topologias mais empregadas, e que é considerada neste trabalho, é a Perceptron Multicamadas (PMC), pertencente à arquitetura *feedforward* de camadas múltiplas, muito aplicada em problemas que envolvem aproximação de funções, controle de processos, classificação de padrões, por exemplo (SILVA, 2016). Sua estrutura é caracterizada, por pelo menos uma camada intermediária (ou escondida) de n_1 neurônios, entre as camadas de entrada (com x_n sinais de entrada) e de saída (com m neurônios), como ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Estrutura de uma rede PMC



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Basicamente, cada neurônio artificial da rede encontra-se interconectado com suas respectivas entradas por meio dos pesos sinápticos (representados pelas flechas na Figura 4), que são vetores ou matrizes numéricas ajustados por meio dos algoritmos de aprendizagem. Cada neurônio, por sua vez, possui a capacidade de avaliar informações vindas de cada entrada, que são ponderadas a partir dos pesos, e geram uma saída proporcional a estes “estímulos”, com base em funções de ativação (representadas pela variável g na Figura 4).

O tipo de aprendizagem desta rede é o supervisionado, caracterizado pela disponibilidade de amostras de entrada com suas respectivas saídas. Logo, é desejável que o algoritmo busque garantir que as saídas da rede sejam praticamente idênticas às saídas desejadas. Para a rede PMC o algoritmo geralmente empregado é o *Backpropagation* (BP), cujos detalhes podem ser encontrados em Silva (2016).

2.3.2 Lógica fuzzy

Os conceitos relacionados à lógica fuzzy surgiram da ideia de reprodução do raciocínio de seres humanos, capazes de lidar com problema complexos, a partir de informações imprecisas. Zadeh foi o idealizador dessa lógica, que buscava uma ferramenta matemática para o tratamento de informações vagas e que não fossem extremas (0 ou 1) como ocorre na lógica clássica (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

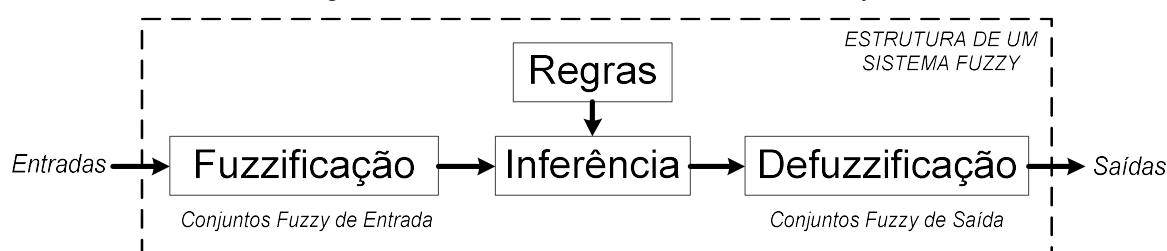
Com base nessa estrutura lógica torna-se possível o desenvolvimento de diversos tipos de sistemas, denominados “sistemas fuzzy”. A Figura 5 ilustra a estrutura de um sistema fuzzy, o qual pode ser dividido em três etapas principais:

- **Fuzzificação:** consiste no mapeamento das entradas (provenientes de uma dada aplicação) em conjuntos fuzzy (ou termos linguísticos), definidos para as variáveis linguísticas;
- **Inferência:** processo que irá relacionar as entradas já condicionadas aos conjuntos fuzzy com as saídas do sistema. Nesta etapa consideram-se as regras linguísticas, conjunto de proposições fuzzy combinadas por meio de

operadores lógicos, que irão associar as variáveis linguísticas de entrada com as de saída (definidas com base no conhecimento do usuário);

- **Defuzzificação:** etapa final que irá transformar as ações fuzzy, definidas na inferência, em ações compatíveis com a aplicação, ou seja, é escolhida a melhor ação para a decisão tomada no processo de inferência, baseada na utilização de métodos matemáticos.

Figura 5 – Estrutura básica de um sistema fuzzy



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

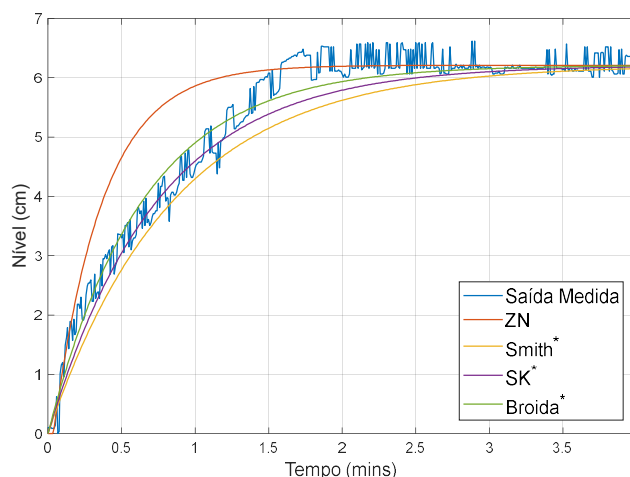
3. METODOLOGIA

3.1 Projeto do controlador PI convencional

A primeira etapa a ser considerada para o projeto do controlador PI é a caracterização do modelo matemático do sistema de controle de nível, ou seja, sua $G(s)$. Sendo assim, neste artigo, para a obtenção dessa função, considerou-se uma análise baseada na comparação das curvas de resposta ao degrau aproximadas fornecidas pelos métodos de identificação de i) Ziegler/Nichols (ZN), ii) Smith, iii) Sundaresan/Krishnaswamy (SK) e iv) Broida, sendo ilustradas na Figura 6.

Durante esta análise foi percebido que, para os métodos de Smith, SK e Broida, o comportamento de resposta ao degrau do sistema ficou mais próximo do sistema real quando o atraso de transporte (L) não foi considerado nas FTs. Na Figura 6 o símbolo (*) na legenda indica justamente esta constatação, ou seja, respostas ao degrau para as funções $G(s)$ resultantes sem considerar o atraso de transporte.

Figura 6 – Comparação das respostas ao degrau obtidas para cada método



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Logo, para a escolha do melhor modelo da planta, considerou-se o índice “Erro Relativo Médio” (ERM), cuja equação é dada abaixo:

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e(i)| \quad (5)$$

em que n é o número total de amostras, sendo $e(i) = y(i) - \hat{y}(i)$, onde $y(i)$ representa a saída real medida enquanto $\hat{y}(i)$ representa a saída estimada pelo modelo para uma dada i -ésima amostra. A Tabela 1 mostra os valores do ERM obtidos para cada um dos modelos resultantes.

Tabela 1 – Erro Relativo Médio (ERM) dos modelos aproximados

Modelo	ZN	ZN*	Smith	Smith*	SK	SK*	Broida	Broida*
ERM	0,4536	0,4995	0,4509	0,3854	0,3705	0,2729	0,2550	0,2331

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Com base nos valores obtidos, é possível concluir que o menor ERM corresponde ao modelo dado pelo método de Broida desconsiderando o atraso de transporte, cuja FT aproximada para a planta de controle de nível é dada por:

$$G(s) = \frac{6,21}{0,6419s + 1} \quad (6)$$

Uma vez obtida a $G(s)$ do sistema de controle é possível desenvolver o projeto do controlador. Neste artigo, optou-se pela utilização do método de resposta em

frequência para o projeto dos ganhos do PI, cujos parâmetros são a frequência de cruzamento de ganho (ω_G), dada em rad/s, e a margem de fase (γ), dada em graus.

Sendo assim, cinco controladores PI foram projetados para o sistema em questão, sendo cada um deles testado em protótipo, a fim de analisar a melhor configuração. Vale destacar que para a discretização dos PIs considera-se o método Trapezoidal, sendo adotada uma taxa de amostragem $T_s = 1\text{ms}$. A Tabela 2 descreve os ganhos K_p e K_i obtidos em cada um dos projetos, assim como seus respectivos parâmetros ω_G e γ . Para a escolha do melhor PI, considerou-se os índices de desempenho IAE e IAU , descritos em (7) e (8), nos quais são realizados os cálculos das integrais dos módulos do erro $e(t)$ e da ação de controle $u_c(t)$, respectivamente. Os valores de IAE e IAU para cada um dos controladores também são mostrados na Tabela 2. Por sua vez, a Figura 7 ilustra o comportamento da variável de saída e da $u_c(t)$ do sistema para cada controlador (vale destacar que tais curvas foram obtidas considerando um cenário de degraus comentado em detalhes na seção 4).

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (7)$$

$$IAU = \int_0^t |u_c(t)| dt \quad (8)$$

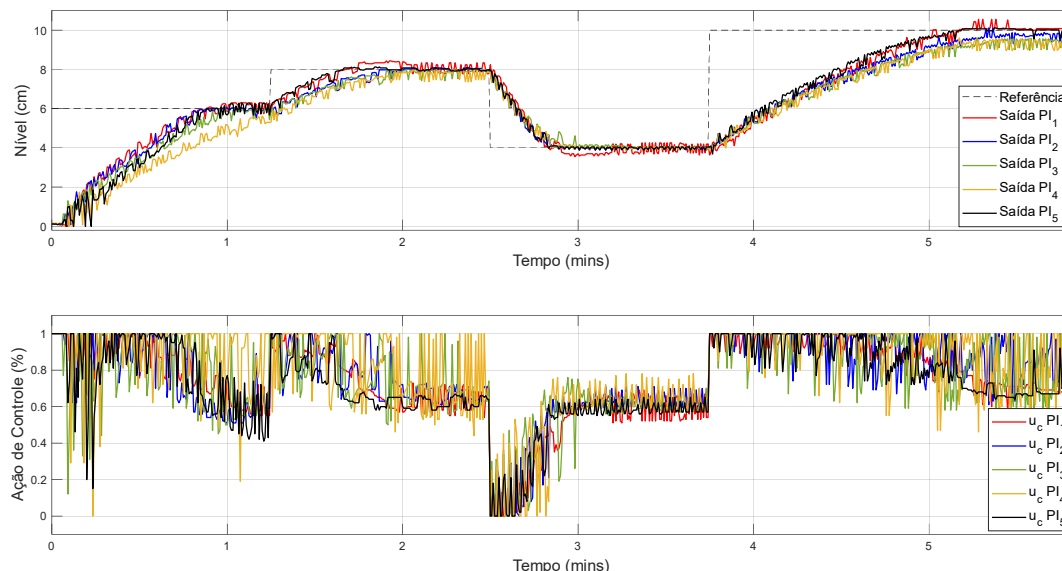
Tabela 2 – Resultados obtidos para os controladores PI

Controlador	ω_G (rad/s)	γ (°)	K_p	K_i	IAE	IAU
PI ₁	5	50	0,29237	2,27771	7,7842	4,3348
PI ₂	10	50	0,68826	7,87726	7,9292	4,4876
PI ₃	10	60	0,81459	6,56244	8,8910	4,3860
PI ₄	15	50	1,08414	16,79865	9,9303	4,6446
PI ₅	8	50	0,52990	5,23882	7,4583	4,1903

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

É possível observar nesta tabela que o controlador “PI₅” é o que resultou em menores valores de IAE e IAU , consequência de um melhor desempenho dentre os controladores analisados. Portanto, este será o controlador PI considerado para o desenvolvimento do projeto do PI-neural, assim como para a análise com os controladores inteligentes.

Figura 7 – Comparação entre os controladores PI projetados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

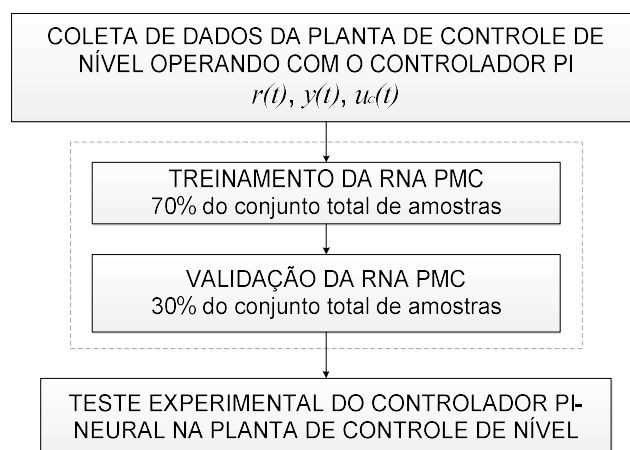
3.2 Projeto do controlador PI-neural

A Figura 8 ilustra a metodologia considerada para a implementação do controlador PI-neural neste artigo, composta por 4 etapas principais:

1. *Coleta dos Dados da Planta*: obtenção do conjunto total de amostras que serão consideradas para o treinamento e validação da RNA, obtidas a partir do sistema de controle operando com o controlador PI (escolhido na seção 3.1). Neste trabalho, considerou-se amostras da referência ($r(t)$), da saída ($y(t)$) e da ação de controle ($u_c(t)$) do sistema;
2. *Treinamento da RNA PMC*: etapa de aprendizagem da rede no qual 70% das amostras são consideradas;
3. *Validação da RNA PMC*: finalizado o treinamento, 30% do conjunto total de amostras, que não foram consideradas na etapa de aprendizagem, são utilizadas para a etapa de validação, visando verificar se a RNA retorna valores de saída próximos aos valores desejados;

4. *Teste do Controlador PI-neural na Planta:* uma vez encerrada a etapa de validação, os pesos sinápticos ajustados podem ser utilizados para a implementação em hardware do PI-neural visando avaliá-lo;

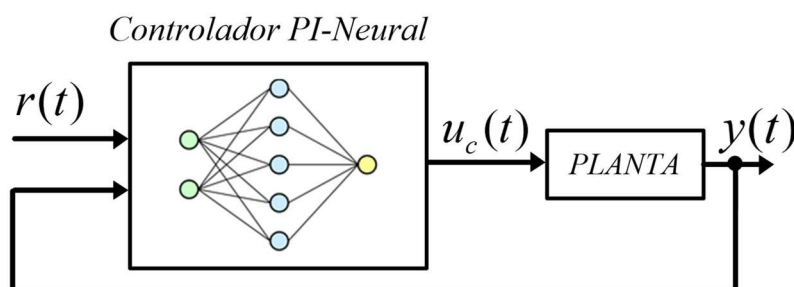
Figura 8 – Metodologia para a implementação do controlador PI-neural



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Vale a pena destacar que a coleta dos dados, assim como as etapas de treinamento e validação foram feitas utilizando algoritmos desenvolvidos no MATLAB via linhas de código e sem utilização de *toolboxes*. O controlador PI-neural da planta de nível implementado neste trabalho é constituído por três camadas, conforme mostrado na Figura 9: i) *camada de entrada*, com dois neurônios correspondentes aos valores de referência ($r(t)$) e de saída do sistema ($y(t)$), ii) *camada escondida*, composta por cinco neurônios e iii) *camada de saída*, com um único neurônio, referente à ação de controle ($u_c(t)$). Os demais parâmetros considerados para o desenvolvimento do controlador são apresentados na Tabela 3.

Figura 9 – Estrutura do controlador PI-neural



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

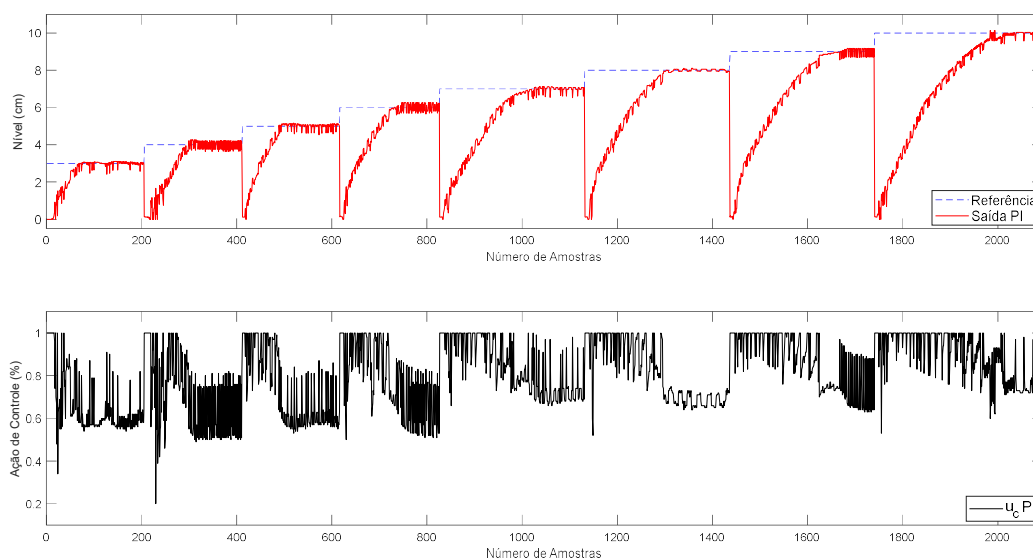
A Figura 10 ilustra o conjunto coletado de amostras composto por valores de referência, saída e ação de controle do protótipo do sistema de nível operando com o controlador PI projetado na seção 3.1. Tais amostras foram obtidas variando-se o valor de referência de 3 cm a 10 cm, com intervalos de 1 cm.

Tabela 3 – Parâmetros da RNA implementada

Neurônios na Camada de Entrada		$x_n = 2$ (referência e saída)	
Neurônios na Camada Escondida		$n_l = 5$	
Neurônios na Camada de Saída		$m = 1$ (ação de controle)	
Função de Ativação dos Neurônios		Tangente Hiperbólica	
Taxa de Aprendizagem do Algoritmo BP		0,001	
Erro requerido		1.10^{-8}	
Número Total de Amostras	Treinamento (70%)	2094	1466
	Validação (30%)		628
Época de Convergência		8568	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 10 – Conjunto de amostras coletadas da planta de controle de nível



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As Tabelas 4 e 5 descrevem os valores dos pesos sinápticos dos neurônios das camadas escondida e de saída obtidos ao final da etapa de treinamento da RNA. A Figura 11 ilustra o resultado do processo de validação da RNA, no qual é possível observar que a rede é capaz de generalizar de forma correta e aproximada ao comportamento do sistema.

Tabela 4 – Pesos sinápticos dos neurônios da camada escondida

	Limiar (θ)	Referência ($r(t)$)	Saída ($y(t)$)
N1	0,6864	0,1139	1,0349
N2	0,6994	0,9739	-0,0011
N3	0,8202	0,5187	0,4461
N4	0,9360	0,4521	0,6384
N5	-0,9479	3,2381	-3,8754

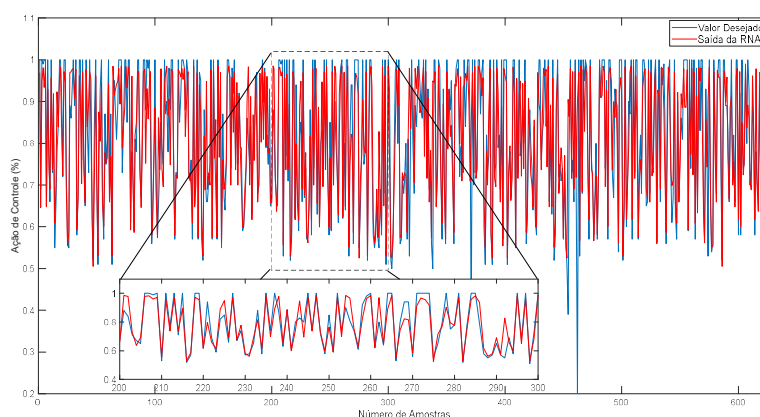
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 5 – Pesos sinápticos do neurônio da camada de saída

	Limiar (θ)	N1	N2	N3	N4	N5
N1	0,2612	0,1581	0,7334	0,6548	0,2102	2,6793

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 11 – Resultado do processo de validação da RNA PMC



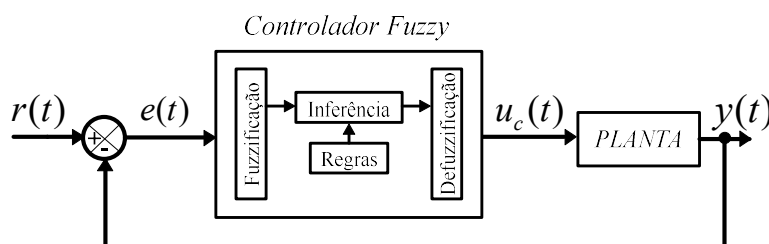
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3 Projeto do controlador fuzzy

A Figura 12 ilustra a estrutura do controlador fuzzy para o controle da planta didática de nível. Como é possível notar, as variáveis linguísticas de entrada e de saída do controlador são o erro ($e(t)$) e a ação de controle ($u_c(t)$) do processo, respectivamente. Esse controlador é basicamente um sistema fuzzy convencional com os estágios de i) fuzzificação, etapa que mapeia o sinal do erro nos conjuntos fuzzy, ii) inferência, etapa caracterizada pelo processamento lógico do sistema, realizando a invocação das regras linguísticas e geração dos resultados, e iii)

defuzzificação, conversão do resultado do processo de inferência em uma ação de controle a ser enviada para a planta. Vale a pena destacar que para este trabalho considerou-se o controlador fuzzy com estrutura do tipo Mamdani, sendo implementado utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox* do software MATLAB.

Figura 12 – Estrutura do controlador Fuzzy

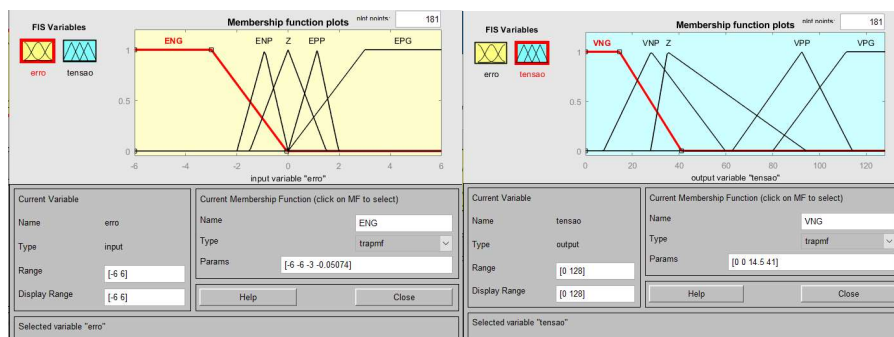


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 13 ilustra as configurações definidas para as variáveis linguísticas de entrada, denominada “erro”, e de saída, denominada “tensao”. Para cada uma delas foram definidos cinco termos linguísticos de mapeamento, $T(\text{erro})$ e $T(\text{tensao})$, e os seguintes universos de discurso, $X(\text{erro})$ e $X(\text{tensao})$, sendo descritos a seguir:

- **Variável “erro”:** ENG (erro negativo grande), ENP (erro negativo pequeno), Z (zero), EPP (erro positivo pequeno) e EPG (erro positivo grande): $T(\text{erro}) = \{\text{ENG}, \text{ENP}, \text{Z}, \text{EPP}, \text{EPG}\}$, $X(\text{erro}) = -6$ a 6 ;
- **Variável “tensao”:** VNG (tensão negativa grande), VNP (tensão negativa pequena), Z (zero), VPP (tensão positiva pequena) e VPG (tensão positiva grande): $T(\text{tensao}) = \{\text{VNG}, \text{VNP}, \text{Z}, \text{VPP}, \text{VPG}\}$, $X(\text{tensao}) = 0$ a 128 ;

Figura 13 – Variáveis linguísticas de entrada (à esquerda) e de saída (à direita)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Tabela 6 descreve os métodos considerados para os conectivos lógicos e operadores do controlador fuzzy. Na Figura 14 são descritas as regras linguísticas para a inferência, definidas com base em aspectos fundamentais de controle:

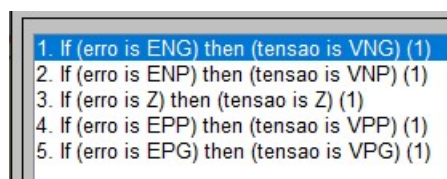
- Se o erro de controle (positivo/negativo) é grande (ou seja, valor de saída muito distante do sinal de referência), muita ação de controle será necessária (ou seja, a tensão enviada para a bomba deverá ser alta);
- Se o erro de controle (positivo/negativo) é pequeno (ou seja, valor de saída muito próximo do sinal de referência), pouca ação de controle será necessária (ou seja, a tensão enviada para a bomba deverá ser baixa);
- Por fim, caso o erro de controle seja zero (indicando que o valor de saída é idêntico ao sinal de referência), nenhuma ação deverá ser realizada;

Tabela 6 – Parâmetros para o controlador fuzzy implementado

Parâmetros	Método
Norma-t e operador de implicação	Min
Conorma-t e operador de agregação	Max
Método de Defuzzificação	Centróide

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 14 – Regras linguísticas adotadas para o controlador fuzzy



1. If (erro is ENG) then (tensao is VNG) (1)
2. If (erro is ENP) then (tensao is VNP) (1)
3. If (erro is Z) then (tensao is Z) (1)
4. If (erro is EPP) then (tensao is VPP) (1)
5. If (erro is EPG) then (tensao is VPG) (1)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Como mencionado anteriormente, toda a estrutura do controlador fuzzy foi implementada considerando o *tool/box* do MATLAB. Portanto, para a integração deste com a planta de controle de nível, considerou-se um algoritmo de controle baseado em comunicação serial entre Arduino e MATLAB. Neste algoritmo, os valores do erro de controle, processados no Arduino, são enviados via serial para o MATLAB, sendo interpretados pelo controlador fuzzy desenvolvido, que gera sinais de atuação enviados novamente via serial para o Arduino, continuando assim a execução do algoritmo de controle no sistema microprocessado.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir são ilustrados os resultados experimentais obtidos para a planta de controle de nível operando com cada um dos controladores projetados, segundo procedimentos apontados nas seções anteriores, neste caso, com o: i) controlador PI, ii) controlador PI-neural e iii) controlador fuzzy. Basicamente, para realizar o estudo comparativo entre os controladores, vários degraus de referência foram considerados, sendo adotado o seguinte cenário experimental: i) $0 < t < 1,25$ mins: referência de nível fixa em 6 cm; ii) $1,25 < t < 2,5$ mins: referência de nível fixa em 8 cm; iii) $2,5 < t < 3,75$ mins: referência de nível fixa em 4 cm; iv) $3,75 < t < 5,8$ mins: referência de nível fixa em 10 cm;

A Figura 15 ilustra os comportamentos do sistema de controle operando considerando os três controladores em estudo. Além disso, para avaliar o desempenho dos controladores, novamente optou-se pela utilização dos índices *IAE* e *IAU*, definidos em (7) e (8), respectivamente. Os valores obtidos considerando estes índices para os controladores projetados são descritos na Tabela 7.

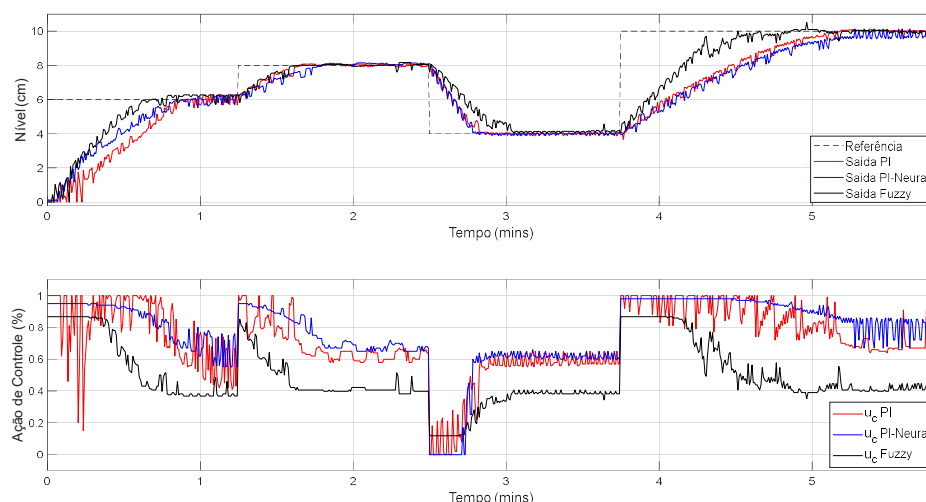
É possível observar nos resultados experimentais, em um primeiro momento, que os três controladores respondem de maneira adequada e efetiva aos degraus de referência impostos, com uma rápida estabilização e sem grandes sobressinais. Analisando minuciosamente o comportamento dos sinais de saída é possível notar que as respostas do sistema operando com os controladores PI e PI-neural são muito similares, com o PI operando mais rápido em quase todos os períodos, exceto entre $0 < t < 1$ min no qual o PI-neural foi mais ágil. Contudo, o sistema operando com o controlador fuzzy obteve, principalmente nos momentos onde houveram degraus de subida, uma resposta mais rápida que os controladores PI e PI-neural.

Além disso, a partir dos resultados obtidos para a ação de controle, é possível notar uma grande característica relacionada aos controladores inteligentes que, neste caso, é o fato de reduzir consideravelmente oscilações de tensão em praticamente todo o cenário de teste, com destaque novamente para o sistema operando com o

controlador fuzzy, cujo comportamento da ação de controle é bem menos oscilatório, o que significa menos esforços na atuação da bomba de água.

Por sua vez, os valores retornados pelos índices de desempenho, descritos na Tabela 7, comprovam uma melhor eficiência de controle do sistema operando com o controlador fuzzy, visto que ambos *IAE* (relacionado ao erro de controle) e *IAU* (relacionado à ação de controle) resultaram em menores valores quando comparados aos controladores PI e PI-neural.

Figura 15 – Comportamentos da planta de controle de nível com os controladores projetados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 7 – Comparação de desempenho entre os controladores projetados

Controlador	<i>IAE</i>	<i>IAU</i>
PI	7,4583	4,1903
PI-Neural	7,4373	4,4860
Fuzzy	5,4566	2,8586

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Um outro aspecto a ser ressaltado com o presente trabalho é com relação aos custos de implementação experimental da planta de controle de nível, os quais estão descritos na Tabela 8. É possível observar que o gasto total do protótipo foi de 435,31 reais, valor consideravelmente baixo quando comparado aos kits disponíveis no mercado, justamente pelo fato de ser composto por dispositivos de baixo custo, além de serem bastante acessíveis.

Tabela 8 – Custos da planta didática de controle

Componentes	Valor
Arduino Uno	R\$ 70,20
Sensor Ultrassônico HC-SR04	R\$ 16,90
Módulo PWM D4184 30A/36V	R\$ 10,90
Fonte Chaveada 60W 12V 5A	R\$ 49,21
Bomba de Água 12 V	R\$ 35,00
Display LCD 16x2 + Módulo I2C	R\$ 22,90
Tanque Acrílico	R\$ 70,00
Reservatório de Água	R\$ 64,90
Cabos 22AWG + Jumpers	R\$ 5,30
Engates Flexíveis de PVC + Mangueira	R\$ 15,00
Válvula Esfera 1/2" Manual	R\$ 15,00
Réguas Plásticas	R\$ 10,00
Placas de Madeira em MDF	R\$ 40,00
Suportes Metálicos + Parafusos	R\$ 10,00
TOTAL	R\$ 435,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho descreveu uma aplicação de controladores inteligentes baseados em lógica fuzzy e redes neurais artificiais em uma planta didática de controle de nível de baixo custo operando com a plataforma Arduino Uno. Todos os procedimentos de projeto de cada controlador foram comentados. Para o projeto do controlador PI foi realizada a modelagem matemática da planta, a partir do método de identificação de Broida, seguido da sintonia pelo método de resposta em frequência. Já o controlador PI-neural, foi projetado considerando amostras compostas por vários pontos de operação do sistema operando com o controlador PI projetado. Por sua vez, o controlador fuzzy também foi implementado segundo aspectos fundamentais relacionados à teoria de controle. Em seguida, os desempenhos dos três controladores foram comparados entre si, sendo notadas vantagens de operação dos controladores inteligentes principalmente com relação ao nível de oscilação de tensão no atuador do sistema. Após uma análise comparativa baseada em observação dos

comportamentos dos sinais de saída e da ação de controle do sistema, assim como nos valores numéricos obtidos por índices de desempenho, pode-se notar que os controladores efetuaram um adequado controle para o sistema, com destaque para o controlador fuzzy, que obteve um desempenho superior.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. P. L. S. **Técnicas fuzzy aplicadas ao controle descentralizado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2014.
- ANDRADE, L. H. S.; AGULHARI, C. M.; GOEDEL, A. Controle PI-neural aplicado a um sistema de vazão. In. XII Simpósio Brasileiro De Automação Inteligente, 2015. UFRN. **Anais...** Natal, 2015. p-468-473.
- ANGÉLICO, B. A.; CAMPANHOL, L. B. G.; SILVA, S. A. O. Proportional-integral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**. v.7, n.10, p.2647–2659, ago. 2014.
- ASTROM, K. J.; HÄGGLUND, T. **PID controllers: theory, design, and tuning**. 2. ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995.
- BERTACHI, A. H.; SILVA, L. R. B.; SUMAR, R. R.; ANGÉLICO, B. A.; GOEDEL, A. Controle de um processo multivariável em uma planta didática industrial utilizando redes neurais. In. XI Simpósio Brasileiro De Automação Inteligente, UFC. **Anais...** Fortaleza, 2013. p-1-6.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. Florianópolis: UFSC, 2004.
- FREIRE JÚNIOR, V. A.; VARGAS, A. N.; GOEDEL, A. Uma abordagem PI-neural aplicado ao controle de um servo-mecanismo. In. XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI), 2013. UFC. **Anais...** Fortaleza, 2013. p-1-6.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. **SBA Controle & Automação**. v.4, n.3, p. 97-115, 1994.
- HAMITI, K. Position control of a pneumatic actuator under the influence of stiction. **Control Engineering Practice**. v.4, n.8, p.1079–1088, 1996.
- MCCROBERTS, M. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec Editora, 2011.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

SILVA, I. N. **Redes neurais artificiais**: para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 2016.

KOZÁK, S. State-of-the-art in control engineering. **Journal of Electrical Systems and Information Technology**. v. 1, n. 1, p. 1-9, 2014.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO TÉRMICA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS USANDO SENSORIAMENTO DE TEMPERATURA NO ESTATOR E REDES NEURAIS

Alisson Antonio dos Santos, Rayssa Milena Castro Correia e Renato Kazuo Miyamoto*

RESUMO

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados na indústria moderna, sendo essenciais para a operação de sistemas produtivos. No entanto, falhas térmicas inesperadas nesses motores podem ocasionar prejuízos significativos. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um estimador de temperatura baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA), com o objetivo de viabilizar o monitoramento preditivo da temperatura em motores de indução trifásicos. Para isso, foi utilizado um sensor de baixo custo instalado diretamente nas bobinas do estator do motor, permitindo a coleta de dados térmicos sob diversas condições reais de operação. Os dados obtidos foram aplicados no treinamento de diferentes topologias de RNA. Os resultados demonstraram uma assertividade superior a 99% em determinadas configurações, evidenciando o potencial da abordagem proposta para a predição de falhas térmicas e para a implementação de estratégias de manutenção preditiva.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico; Manutenção preditiva; Falhas térmicas; Redes neurais artificiais; Monitoramento de temperatura.

Thermal Condition Monitoring of Three-Phase Induction Motors Using Stator Temperature Sensing and Neural Networks

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in modern industry and are essential to the operation of production systems. However, unexpected thermal failures in these motors can result in significant losses. This work proposes the development of a temperature estimator based on Artificial Neural Networks (ANNs) to enable predictive temperature monitoring in three-phase induction motors. A low-cost sensor was installed directly on the motor stator windings to collect thermal data under various real operating conditions. The collected data were used to train different ANN topologies. The results showed assertiveness exceeding 99% in certain configurations, highlighting the potential of the proposed approach for thermal fault prediction and the implementation of predictive maintenance strategies.

Keywords: Three-phase induction motor; Predictive maintenance; Thermal faults; Artificial neural networks; Temperature monitoring.

* Autor correspondente (e-mail): renato.miyamoto@sistemapiep.org.br

1. INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico (MIT) é amplamente utilizado em diferentes áreas da indústria devido ao seu baixo custo de aquisição e manutenção, eficiência, facilidade de controle e robustez diante de diversos ambientes e cargas mecânicas. Isso pode ser constatado pelo fato de que os motores elétricos são responsáveis por 43% a 46% do consumo de energia elétrica total produzida no mundo (Robles *et al.*, 2021; Prince; Hati, 2021).

Segundo o Grupo *ABB*, cerca de 45% da eletricidade consumida no mundo é utilizada no acionamento de motores industriais e, aproximadamente 300 milhões de motores elétricos industriais estão atualmente em operação. As indústrias são responsáveis pelo consumo de 35% da energia elétrica produzida no Brasil (segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Adicionalmente, de acordo com Weg (2021), estima-se que no Brasil existam mais de 20 milhões de motores de indução trifásico (MIT) em operação. A mesma pesquisa indica que esses motores consomem aproximadamente 140 GW/h por ano, o que corresponde a 23,25% do consumo total de energia elétrica do Brasil.

Com a competição entre empresas e a constante busca por linhas de produção mais eficientes e menos dispendiosas, cria-se a demanda pelo monitoramento contínuo da saúde dos motores. Fazendo uso de tal monitoramento é possível detectar de forma precoce falhas que possam vir a ocorrer no motor, permitindo assim medidas preventivas, com o intuito de aumentar a vida útil da máquina, e diminuir o tempo que a linha de produção precisaria ficar interrompida. Este fato pode contribuir para a redução dos custos da indústria, tornando-a mais competitiva perante o mercado (Choudhary *et al.*, 2019).

Dentre as diversas condições que podem comprometer a integridade operacional dos motores de indução trifásicos (MIT) destaca-se a sobrecarga térmica, que pode ser proveniente de alguns fatores, a saber: i) causada pela deterioração de componentes do motor; ii) causada pela sobrecarga mecânica no eixo do motor; e iii) causada pelo desequilíbrio de tensão de alimentação do motor de indução.

A sobrecarga térmica pode ser causada pela deterioração nos diversos componentes do motor de indução trifásico (MIT), entre eles: os condutores do estator e do rotor, o isolamento, o núcleo e os rolamentos, destacando-se como uma das principais causadoras de falhas nos motores (Bonnett, 1992).

A sobrecarga mecânica também representa um fator crítico para a vida útil dos motores de indução trifásicos (MIT). Esse tipo de sobrecarga ocorre quando o motor é submetido a esforços superiores à sua capacidade nominal, seja por variações na carga acionada, desalinhamento de componentes, acoplamentos inadequados ou bloqueio mecânico do eixo. Esse estresse excessivo pode resultar em aquecimento anômalo, desgaste prematuro dos rolamentos, aumento do consumo de energia e redução da eficiência do motor. Com o tempo, a sobrecarga mecânica pode levar à falha prematura do sistema, tornando indispensável a adoção de estratégias de monitoramento e manutenção preditiva para evitar paradas inesperadas e custos elevados de reparo (Bonnett, 1992).

Já quando o motor opera em condição de desequilíbrio de tensão, o aquecimento excessivo intensifica o estresse térmico nos componentes internos, acelerando o processo de degradação dos materiais isolantes e dos rolamentos. Esse aumento de temperatura impacta diretamente a eficiência do motor, elevando as perdas energéticas e contribuindo para um desgaste prematuro dos componentes. Além disso, apresenta simultaneamente características girante e pulsante em seu torque eletromagnético.

Segundo Oliveira (2011), devem ser consideradas as componentes de sequência inversa da tensão associando um campo girante de mesma frequência com sentido de rotação inverso àquele da sequência direta. Esse fenômeno, além de sobreaquecimento, gera um aumento significativo da vibração do eixo, diminuindo em até quatro anos e meio de serviço na vida útil do MIT trabalhando com um fator de dois por cento de desequilíbrio.

Neste cenário, a termografia é uma das técnicas geralmente utilizadas para o monitoramento térmico de MITs, por ser uma ferramenta não invasiva. A partir de uma câmera termográfica é possível a visualização do comportamento térmico da

superfície do motor, o que permite a detecção de uma possível anomalia térmica (Pinheiro, Romário de Mesquita et al. (2012); Picazo-Rodenas *et al.* (2012). Entretanto, a medição através de câmeras termográficas possui seus contrapontos. De acordo com Lagüela *et al.* (2011), a diferença entre as aferições de câmeras de marcas diferentes é discutida.

Na pesquisa de Lopes *et al.* (2013) utilizou-se um sensor de temperatura para monitorar o aquecimento externo na carcaça do MIT. Ainda, aplicaram-se redes neurais artificiais para estimar o valor da temperatura em momentos futuros, aplicando situações que submetam o MIT a temperaturas que ultrapassam o seu limite térmico, possibilitando a detecção da elevação de temperatura da carcaça da máquina. Foram elaboradas duas matrizes de 13 linhas e 50 colunas, a primeira contendo subamostras de 1000 dados e a segunda de 500 dados. Os autores coletaram os dados da temperatura da carcaça do MIT.

Assim, o uso de sistemas inteligentes vem se destacando na identificação e no monitoramento preditivo de falhas em máquinas elétricas. De forma a tratar com robustez as incertezas no processamento de dados, pode-se utilizar as Redes Neurais Artificiais (RNA) (Suetake, 2012). Com as novas técnicas da indústria 4.0, a análise em tempo real dos parâmetros de uma máquina está tornando-se corriqueira devido a crescente capacidade de processamento e armazenamento de dados, além da maior conectividade dentro das indústrias (Qi; Tao, 2018).

O monitoramento térmico de MIT possui diversas abordagens e estudos que comprovam sua eficiência em detectar a falha precoce, permitindo corrigir os problemas de maneira planejada e antecipada. Entretanto, observa-se uma carência em obter dados dos motores sob diversas condições de carga e tensão de operação. Com a dependência de motores de indução trifásicos nas aplicações industriais, a manutenção térmica preditiva permite estender a vida útil da máquina e o processo produtivo, reduzindo o tempo de parada não programada que poderiam levar a perdas financeiras.

Diante desse contexto, a principal motivação deste trabalho consiste na aplicação de redes neurais no monitoramento preditivo da temperatura em um motor

de indução trifásico. Para isso, foram coletados dados de temperatura do enrolamento do estator de um MIT sob diversas condições operacionais, incluindo situações de carga e sobrecarga mecânica, rolamentos em estado saudável e deteriorado, além de variações de tensão. A aquisição dos dados foi realizada por meio de sensores de baixo custo e microcontroladores, viabilizando um sistema acessível e eficiente. Esses dados são utilizados para o treinamento de uma rede neural, com o objetivo de desenvolver um estimador de temperatura capaz de prever variações térmicas e indicar possíveis falhas, contribuindo para a manutenção preditiva e a maior confiabilidade dos motores elétricos.

Assim, o presente estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver um modelo eficiente de monitoramento da temperatura desses motores para prever variações térmicas em diferentes condições de operação, permitindo a detecção precoce de anomalias. Dessa forma, o trabalho contribuirá para a otimização de estratégias de manutenção preditiva, reduzindo paradas não programadas e aumentando a confiabilidade dos sistemas industriais. Uma breve introdução sobre as contribuições e as características do tema proposto nesse trabalho foi apresentada. A sequência deste trabalho está organizada em 4 seções, a saber: fundamentação teórica, metodologia, apresentação de resultados e conclusão.

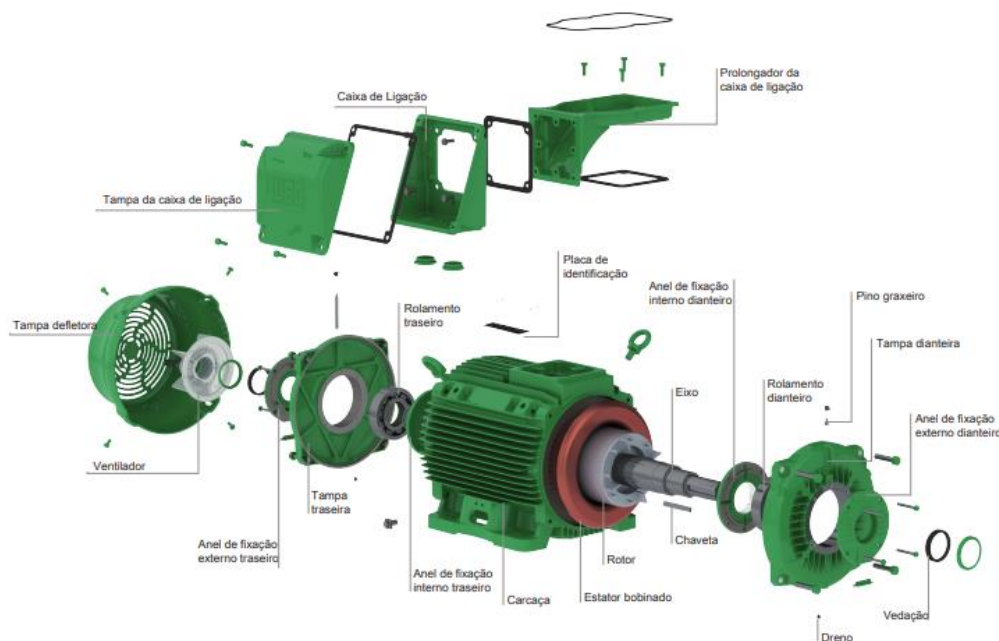
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta o embasamento teórico sobre os motores de indução trifásicos (MIT), e sobre os sistemas que podem ser aplicados para uma detecção de falhas térmicas nessas máquinas elétricas. Ainda, são abordados os aspectos referentes aos sensores utilizados para leitura dos dados, ao *hardware* e aos *softwares* utilizados para efetuar a aquisição dos dados desse trabalho.

2.1 O motor de indução trifásico e seu modelo térmico

Segundo Barbara (2023), as máquinas de indução trifásicas possuem entre as suas partes construtivas os enrolamentos do estator, o rotor, o estator, os rolamentos, a carcaça e os terminais de ligação. O rotor desta máquina pode ser do tipo gaiola de esquilo, onde o enrolamento dele é constituído por barras conectadas entre si. A Figura 1 mostra as partes de uma máquina de indução trifásica com rotor em gaiola de esquilo. Destacam-se as partes construtivas do motor, tais como o estator, o rotor, os enrolamentos do estator e os rolamentos. Quando há desgaste ou falha nos rolamentos, ocorre aumento da excentricidade do rotor, o que pode gerar aquecimento anômalo no estator devido ao atrito irregular e às vibrações. Esse aquecimento excessivo compromete o isolamento das bobinas e acelera a degradação dos materiais, reduzindo a vida útil do motor e aumentando o risco de falhas térmicas.

Figura 1 - Partes de uma máquina de indução trifásica assíncrona.



Fonte: Weg (2021).

Segundo Toliyat (2004), as condições que podem submeter motores de indução trifásicos (MIT) a temperaturas acima de seu limite térmico envolvem três categorias principais: sobrecarga térmica transiente ou de partida, sobrecarga durante o funcionamento e condições anormais de resfriamento. A primeira categoria inclui situações como sobrecargas transitórias, partidas frequentes e rotor bloqueado, além de curto-circuito com falta à terra. A segunda categoria refere-se a sobrecargas contínuas e ao desequilíbrio das tensões de alimentação. Por fim, as condições anormais de resfriamento abrangem a operação em ambientes com temperatura elevada e a redução da capacidade de arrefecimento do motor.

A Figura 2 apresenta as principais falhas que ocorrem em motores de indução trifásicos, destacando a predominância de falhas localizadas nas bobinas do estator.

Figura 2 - Principais falhas em motores de indução trifásico.



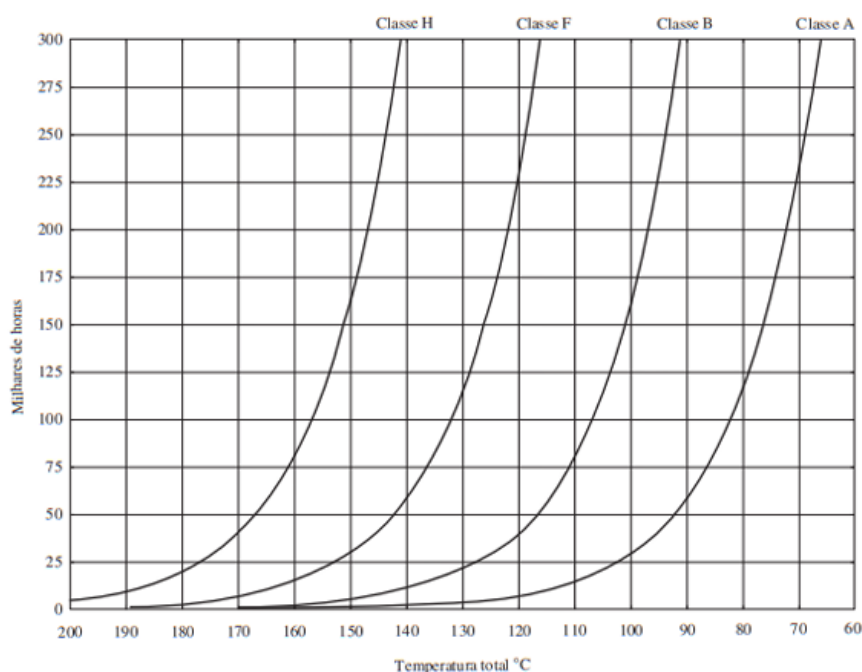
Fonte: WEG (2021).

De acordo com a ilustração, aproximadamente 94% das falhas estão concentradas nessa região, evidenciando sua vulnerabilidade diante das condições

operacionais adversas. Essa concentração de falhas pode estar relacionada à exposição direta das bobinas ao aquecimento excessivo, vibrações mecânicas e degradação do isolamento. A análise da figura reforça a relevância do monitoramento térmico focado nos enrolamentos do estator, uma vez que o comprometimento dessa área pode levar à perda total do motor.

Os motores de indução possuem características térmicas, mecânicas e elétricas que devem ser respeitadas para seu funcionamento adequado e longevidade. Referente às características térmicas o motor de indução é dividido em categorias sendo elas A,E,B,F,H, conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 - Gráfico da relação entre vida útil e temperatura de funcionamento.



Fonte: Chapman (2013).

Na referida classificação, a classe A permite uma elevação de temperatura de até 60 C°, enquanto a categoria H permite uma elevação de até 125 C° (CHAPMAN, 2013). Como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 3, operar o motor acima da temperatura nominal da respectiva classe de isolamento gera uma perda significativa em vida útil da máquina.

Segundo Avolio (1992), o modelo térmico do motor de indução trifásico baseia-se na analogia existente entre o comportamento de um circuito elétrico tipo RC alimentado por uma fonte de corrente e o comportamento térmico da máquina. Embora ela seja composta por partes que se diferenciam fisicamente, quando feita a análise do comportamento térmico de somente algumas dessas partes, pode ser utilizada a teoria do aquecimento de um corpo sólido ideal, ocasião em que o calor é dissipado uniformemente por toda sua superfície, conforme a seguinte expressão:

$$Q \cdot dt - A \cdot \lambda \cdot \theta \cdot dt = m \cdot c \cdot d\theta \quad (1)$$

onde:

Q é a energia térmica por unidade de tempo (W);

A é a área da superfície do corpo;

λ é o coeficiente de transmissão de calor do corpo ($\frac{W}{^{\circ}C \cdot m^2}$);

θ é a temperatura do corpo ($^{\circ}C$);

m é a massa do corpo (kg);

c é o calor específico do material que constitui o corpo ($\frac{W \cdot s}{^{\circ}C \cdot Kg}$).

Assim, através da equação (1), observa-se que a obtenção da temperatura na máquina pelo uso do modelo matemático exige conhecer os parâmetros térmicos do motor em análise. Estes parâmetros variam conforme o projeto da máquina. Desta maneira, faz-se necessária a utilização de um procedimento de baixo custo para avaliar a temperatura no motor, independentemente dos parâmetros térmicos da máquina.

2.2. Sobrecargas Térmicas em Motores de Indução

A sobrecarga térmica pode comprometer a integridade operacional dos motores de indução trifásicos (MIT) e pode ser causada por:

- i) deterioração de componentes do motor;
- ii) pela sobrecarga mecânica no eixo do motor;

iii) pelo desequilíbrio de tensão de alimentação do motor de indução.

2.2.1 Deterioração de Componentes do Motor

Os rolamentos consistem nos componentes-chave do sistema de transmissão mecânica do motor e são empregados para reduzir o efeito do atrito no rotor. Devido às forças radiais, o desgaste superficial do rolamento entre as pistas e esferas é frequentemente negligenciado devida à lenta degradação. O acúmulo dos desgastes leva a uma crescente folga radial, provocando a excentricidade dinâmica do rotor, que por sua vez deteriora as condições de trabalho da máquina (Liu, Y. *et al.*, 2022; Machado, T. H.; Alves; Cavalca, 2019).

Nesse contexto, os desgastes abrasivos ocorrem naturalmente com o uso contínuo dos rolamentos. No entanto, efeitos secundários influenciam os desgastes, como a intrusão de partículas estranhas nos rolamentos (poeiras, grãos abrasivos e limalhas) e as falhas na lubrificação (falta, excesso ou lubrificante inadequado). Como consequência, o atrito no rolamento aumenta e pode resultar em problemas de pontuação, indentação e abrasão da peça. Desse modo, o desempenho do rolamento devido aos desgastes diminuirá com o passar do tempo, aumentando a excentricidade do rotor no estator. Nesse caso, problemas de aquecimento, oscilações na velocidade e torque instantâneos do motor serão acentuados (Kumar N.; Vinothraj C.; Isha T. B., 2018; Liu, Z.; Zhang, 2020).

2.2.2 Sobrecarga mecânica no eixo do motor

A sobrecarga ocorre devido ao aumento do carregamento mecânico do motor acima do seu valor nominal. Como a carga no eixo torna-se excessiva, o rotor perde rotação e pode ficar bloqueado; situação equivalente a um curto-circuito. Embora a máquina de indução seja projetada para suportar sobrecargas por certos períodos, a persistência desta condição faz com que a corrente se eleve acima do valor nominal. Nesse caso, há um aumento considerável do estresse térmico sobre o motor,

reduzindo sua vida útil e causando danos na isolação do enrolamento do estator. Os efeitos da sobrecarga são minimizados normalmente por relés de sobrecorrente ou fusíveis de proteção conectados na alimentação da máquina (Gonzalezcordoba *et al.*, 2017; Karmakar *et al.*, 2016).

2.2.3 Desequilíbrio de tensão de alimentação do motor

Os desequilíbrios de tensão provocam a circulação de correntes de sequência negativa nos motores de indução, elevando as perdas ôhmicas nos enrolamentos da máquina, produzindo oscilações no torque, potência e velocidade. Nesse caso, o aumento da energia dissipada no cobre leva a um acréscimo da temperatura das bobinas, acelerando a degradação do isolamento do estator. Para as máquinas do tipo gaiola de esquilo, a resistência de sequência negativa é da ordem de cinco vezes maior que a resistência de sequência positiva (Donolo; Bossio; De Angelo, 2011).

As técnicas de monitoramento para o diagnóstico de falhas em motores de indução precisam ser aperfeiçoadas para detectar, o mais rápido possível, os diferentes tipos de falhas que podem ocorrer no motor. As redes neurais artificiais possuem características que podem detectar essas falhas dependendo apenas de sua programação. É necessário selecionar apropriadamente as entradas e saídas da rede, a estrutura e os dados convenientes para o seu treinamento. Desta forma, na sequência, são descritos os aspectos relacionados a lógica e ao princípio de funcionamento das Redes Neurais Artificiais.

2.3 Redes neurais artificiais

A Rede Neural Artificial (RNA) é um sistema criado para emular o modo como o cérebro humano aborda uma tarefa específica. Assim, pode ser definida como um conjunto de ferramentas computacionais inspiradas no sistema nervoso de seres vivos. As RNAs consistem em neurônios artificiais conectados por sinapses artificiais, representadas por vetores ou matrizes de pesos sinápticos (Lopes *et al.*, 2013).

Essas redes são conjuntas de unidades de processamento que têm a capacidade de adquirir e reter conhecimento com base em informações. Entre suas principais características estão a adaptação por experiência, a habilidade de aprendizado, a capacidade de generalização, a organização de dados, a tolerância a falhas, o armazenamento distribuído e a facilidade de prototipagem (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

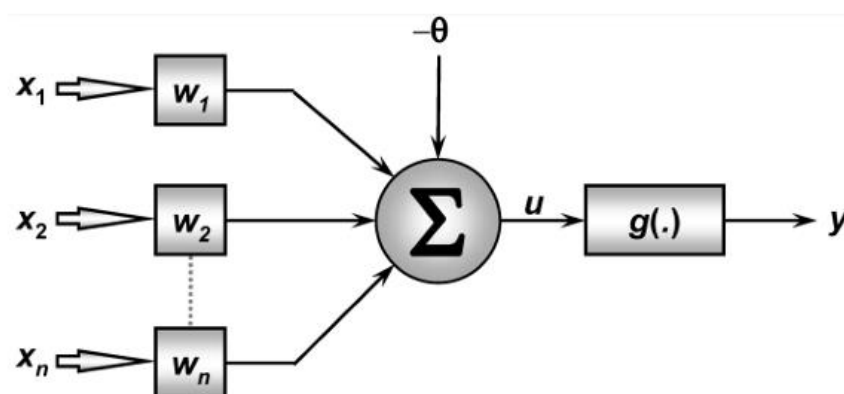
Com isso, é possível desenvolver modelos capazes de prever o comportamento de um processo específico e tomar ações para controlá-lo de maneira adequada. Essas redes oferecem a capacidade não apenas de aprender com dados, mas também de aplicar esse conhecimento para previsões e controle eficaz (Haykin, 2001). Com o significativo avanço tecnológico, os microprocessadores viram seu poder computacional ampliado, o que impulsionou o uso das redes neurais como uma alternativa inovadora para resolver problemas complexos em diferentes campos, entre eles a estimativa de temperatura em motores elétricos.

O processamento de informações no cérebro humano é governado por elementos processadores biológicos que operam em paralelo. A unidade fundamental do sistema nervoso cerebral é o neurônio, cuja função principal consiste na condução de impulsos, ou seja, estímulos elétricos (Haykin, 2001). Os neurônios biológicos são responsáveis por todo o processamento gerenciado pelo cérebro humano. Essas células nervosas formam a base do sistema nervoso, facilitando a comunicação, a transmissão de informações e a coordenação das funções cerebrais. Apesar disso, é relevante mencionar que não há contato físico direto entre eles. A comunicação entre neurônios acontece por meio de estruturas chamadas sinapses, imersas em substâncias neurotransmissoras, que viabilizam a transferência de informações de um neurônio para outro (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

No contexto do modelo biológico, as influências transmitidas pelas conexões sinápticas são representadas em neurônios artificiais por conjuntos de pesos sinápticos (denominados como $W_1, W_2 \dots W_n$). Analogamente, a relevância de cada entrada individual $X_1, X_2 \dots (X_n)$ para o neurônio é determinada ao multiplicá-la pelo peso sináptico correspondente (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

Isso implica que todas as informações provenientes do exterior e recebidas pelo neurônio são consideradas, resultando na saída do neurônio artificial, que é o produto dessas ponderações das entradas, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Neurônio Artificial



Fonte: Silva *et al.*, (2010).

Segundo Silva *et al.* (2010), o funcionamento de um neurônio descreve-se pela seguinte equação matemática:

$$Y = g\left(\sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i + b\right) \quad (2)$$

onde:

n é o número de entradas do neurônio;

W_i é o peso associado com a i -ésima entrada;

b é o limiar associado ao neurônio;

X_i é a i -ésima entrada do neurônio;

$g(.)$ é a função de ativação do neurônio;

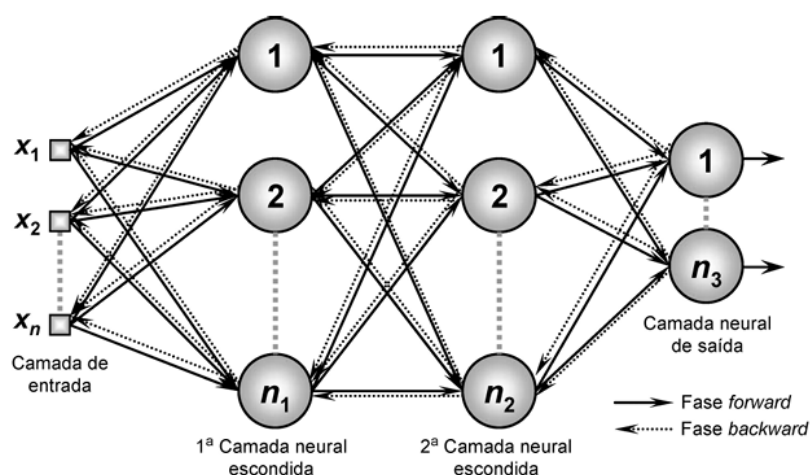
Y é a saída do neurônio.

Diversas topologias de RNA são obtidas com base na estrutura do neurônio artificial, podendo ser classificadas como redes de camada única ou redes multicamadas. Dessa forma, um neurônio artificial caracteriza-se por ser a unidade básica de processamento em uma rede neural. O *perceptron*, por sua vez, é um tipo

específico de rede neural composta por um único neurônio ou camada de neurônios, capaz de realizar apenas classificações lineares simples. No entanto, quando múltiplas camadas de neurônios são empilhadas em uma rede, formando o que é conhecido como uma rede neural *Perceptron* de Múltiplas Camadas (PMC), ela se torna capaz de lidar com tarefas mais complexas e não lineares (Lopes et al., 2013).

A transformação de um neurônio artificial em uma PMC envolve a criação de várias camadas de neurônios interconectados. Cada camada, exceto a de entrada, contém neurônios que recebem sinais de todos os neurônios da camada anterior. Esses neurônios em camadas intermediárias (também chamadas de camadas ocultas) processam as informações recebidas, aplicam pesos e funções de ativação, e passam as saídas para a próxima camada, conforme ilustra a Figura 5 (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

Figura 5 – Treinamento de uma PMC



Fonte: Silva et al. (2010).

A adição de múltiplas camadas permite que a rede aprenda representações mais complexas dos dados, capturando relações não lineares entre as características. Isso é alcançado por meio de um processo chamado treinamento, no qual a rede neural ajusta os pesos das conexões entre os neurônios para minimizar o erro entre as saídas previstas e os resultados reais durante a fase de treinamento (Haykin, 2001).

Um dos métodos de treinamento mais consolidados consiste no treinamento supervisionado *backpropagation* conhecido também como regra Delta generalizada, ele usa o gradiente descendente para atualizar os pesos, minimizando o erro entre a saída real e a desejada, o gradiente descendente é um algoritmo de otimização usado para encontrar o mínimo de uma função, ou seja, o ponto onde essa função tem o menor valor possível conforme a equação 3.

$$W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t+1)} = W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t)} + \eta \cdot \delta_j^{\{(L)\}} \cdot Y_i^{\{(L-1)\}} \quad (3)$$

onde:

$W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t)}$ é o valor atual do peso entre o neurônio i da camada $L - 1$ e o neurônio j ;

η é a taxa de aprendizagem;

$\delta_j^{\{(L)\}}$ é o erro local do neurônio j da camada L ;

$Y_i^{\{(L-1)\}}$ é a saída do neurônio i da camada anterior;

$W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t+1)}$ é o novo valor do peso após a atualização.

Esse método é muito utilizado no treinamento de redes neurais e em outros algoritmos de aprendizado de máquina. Outro algoritmo de otimização é o gradiente descendente com momentum, O termo momentum foi introduzido para acelerar o aprendizado e evitar que o algoritmo fique preso em mínimos locais conforme a equação 4 (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

$$W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t+1)} = W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t)} + \alpha \cdot (W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t)} - W_{\{ji\}}^{\{(L)\}(t-1)}) + \eta \cdot \delta_j^{\{(L)\}} \cdot Y_i^{\{(L-1)\}} \quad (4)$$

onde α é definida como taxa de momentum.

O treinamento ocorre em duas etapas. A primeira etapa, conhecida como "propagação direta" (*forward*), inicia-se ao inserir os sinais x_1, x_2, \dots, x_n de uma amostra do conjunto de treinamento nas entradas da rede. Esses sinais são então propagados através das várias camadas da rede, culminando na geração das respectivas saídas. Em seguida, as respostas produzidas pelas saídas da rede são

confrontadas com as respostas desejadas disponíveis, dado que se trata de um processo de aprendizado supervisionado (Silva; Spatti; Flauzino, 2010).

Se considerarmos uma rede *Perceptron* Multicamadas (PMC) com n_3 neurônios em sua camada de saída, os n_3 desvios (erros) correspondentes entre as respostas desejadas e aquelas geradas pelos neurônios de saída são calculados. Esses desvios são então empregados para ajustar os pesos e limiares de todos os neurônios da camada. Após obter esses valores de erro, inicia-se a segunda fase do método *backpropagation*, denominada "propagação inversa" (*backward*). Nesta fase, ocorrem as modificações (ajustes) dos pesos sinápticos e limiares de todos os neurônios da rede, diferentemente da etapa anterior, focada na avaliação e cálculo dos erros (Haykin, 2001).

Os sistemas de aquisição de dados devem atuar em conjunto com as redes neurais artificiais. Eles são responsáveis por capturar os dados provenientes de sensores e realizar uma preparação de informações em formatos adequados para alimentar as redes neurais. Para a aquisição dos dados será utilizado um sensor de temperatura DS18B20 e uma placa Arduino UNO, responsável por enviar os valores para o *software Node-Red* e armazená-los em tabela Excel. Essa tabela é utilizada para treinamento e validação de uma RNA no *software MatLab*. Os aspectos relacionados ao *hardware* e *software* que podem ser aplicados na aquisição de sinais estão detalhados a seguir.

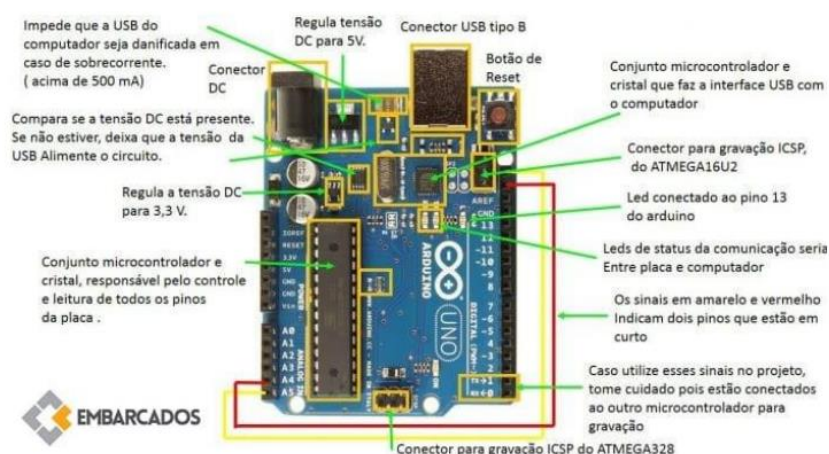
2.4. Hardware e software aplicados para a aquisição de sinais

2.4.1 Arduino UNO

O Arduino foi criado em 2005 por um grupo de pesquisadores italianos, com o propósito de elaborar um dispositivo barato, fácil de programar, funcional e acessível para estudantes e projetistas. O conceito de *hardware* livre acompanha o Arduino, dessa forma, torna-se possível melhorar, modificar, personalizar o Arduino, tendo como princípio o mesmo *hardware* básico (Teles, 2016).

Segundo Rocha (2019), apesar de não ter a opção de fazer *debug*, trata-se de uma ótima ferramenta para quem está estudando o assunto ou para quem deseja fazer simulação de projetos antes de partir para uma placa finalizada, com os componentes soldados. É simples e possui características de *hardware* mínimas, mas que atendem perfeitamente vários tipos de projetos. A conectividade *USB* e a facilidade em programar são atrativos diferenciados e que possuem grande importância para quem busca fazer projetos destinados ao Arduino. A Figura 6 ilustra as principais partes que compõem o Arduino UNO.

Figura 6 - Componentes do Arduino Uno



Fonte: Rocha, 2019

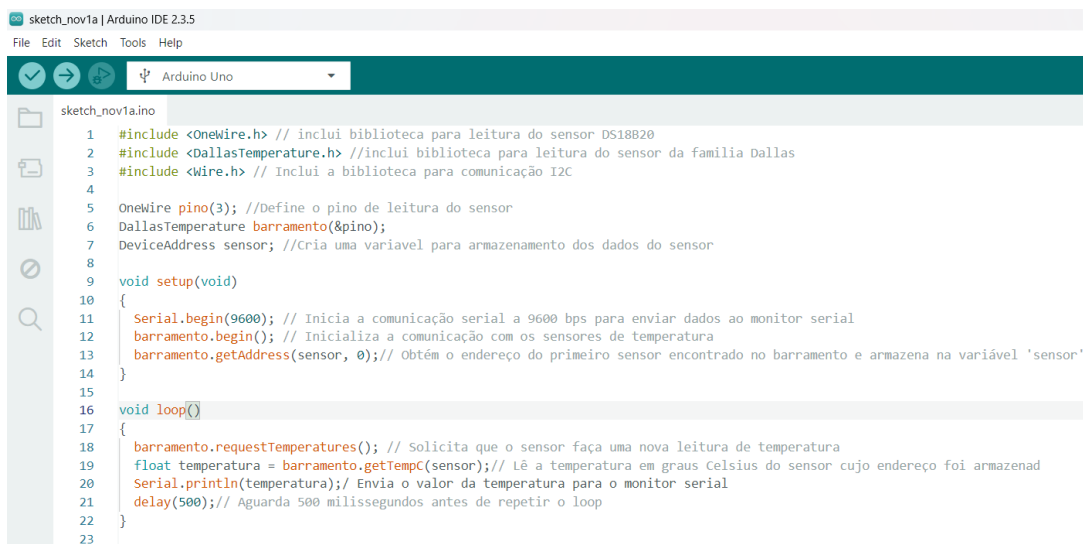
2.4.2 Interface de Desenvolvimento e Linguagem de Programação

Segundo Silva e Paulo Henrique de Oliveira (2013), para utilizar um Arduino é necessário o aplicativo de uma Interface de Desenvolvimento (IDE), onde todo o código é desenvolvido antes de enviar o programa para a *hardware*.

O código escrito para o Arduino é estruturado por duas partes básicas. A primeira é chamada de *setup()* – nesta etapa as opções iniciais do programa são definidas e escritas. Nessa parte, é possível definir se uma porta será usada como entrada ou saída. Na segunda etapa, chamada de *loop()*, é escrita a estrutura de

comandos que será executada de forma constante, ou até que um comando de “pare” seja enviado ao Arduino, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Código Arduino IDE



```

1  #include <OneWire.h> // inclui biblioteca para leitura do sensor DS18B20
2  #include <DallasTemperature.h> // inclui biblioteca para leitura do sensor da familia Dallas
3  #include <Wire.h> // Inclui a biblioteca para comunicação I2C
4
5  OneWire pino(3); //Define o pino de leitura do sensor
6  DallasTemperature barramento(&pino);
7  DeviceAddress sensor; //cria uma variavel para armazenamento dos dados do sensor
8
9  void setup(void)
10 {
11   Serial.begin(9600); // Inicia a comunicação serial a 9600 bps para enviar dados ao monitor serial
12   barramento.begin(); // Inicializa a comunicação com os sensores de temperatura
13   barramento.getAddress(sensor, 0); // Obtém o endereço do primeiro sensor encontrado no barramento e armazena na variável 'sensor'
14 }
15
16 void loop()
17 {
18   barramento.requestTemperatures(); // Solicita que o sensor faça uma nova leitura de temperatura
19   float temperatura = barramento.getTempC(sensor); // Lê a temperatura em graus Celsius do sensor cujo endereço foi armazenad
20   Serial.println(temperatura); // Envia o valor da temperatura para o monitor serial
21   delay(500); // Aguarda 500 milissegundos antes de repetir o loop
22 }
23

```

Fonte: Do Autor (2025).

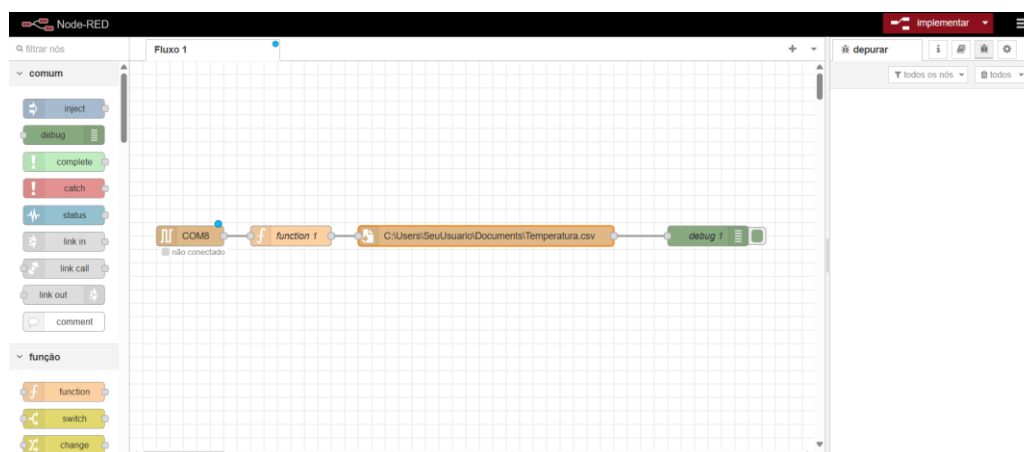
2.4.3 Node-Red

A ferramenta *Node-RED* foi desenvolvida pela IBM para o ensino de *IoT*, e permite aos programadores modelar, implementar e validar diversas aplicações usando uma interface interativa, amigável e com uma curva rápida de aprendizado. A metodologia utilizada é a de projetos e ensino com exemplos (Ferreira, 2017).

O *Node-RED* opera em código aberto e permite a programação através de fluxos (*flow-based programming*), usando uma interface no navegador. A plataforma possui vários nós com diferentes funcionalidades que podem ser conectados de forma coerente permitindo a passagem do fluxo de informações e criando aplicações. O princípio é simples, cada nó possui uma funcionalidade bem definida e a maioria dos nós abstrai a implementação do programador (Ferreira, 2017).

A Figura 8 ilustra os nós utilizados na programação do *Node-Red* com a finalidade de armazenar os dados de temperatura vindos no Arduino via comunicação serial em planilha *Excel*.

Figura 8 - Plataforma Node-Red



Fonte: Do Autor (2025)

2.4.4 Sensor de temperatura DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20 é um dispositivo que responde a um estímulo físico ou químico de maneira específica, produzindo um sinal que pode ser transformado em outra grandeza física para fins de medição e/ou monitoramento, geralmente um sinal elétrico. O sensor DS18B20, produzido pela empresa de semicondutores *Dallas Semiconductor* é um termômetro digital com resolução programável de 9 a 12 *bits* e interface de comunicação exclusiva 1-Wire, que requer apenas um pino de porta para comunicação, seu range de medição varia de -55°C até +125°C, a qual possui uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ entre valores de -10°C à +85°C (Semiconductor, 2014).

2.4.5 Software MATLAB

O *MATLAB*, desenvolvido pela empresa norte americana *MathWorks*, é uma poderosa plataforma de computação técnica que se destaca como uma ferramenta essencial para uma ampla gama de aplicações em ciência, engenharia e pesquisa. Seu nome, derivado do termo "*Matrix Laboratory*" ou "Laboratório de Matrizes", reflete a ênfase na manipulação eficiente de matrizes, proporcionando um ambiente

computacional altamente eficaz para análise numérica, modelagem matemática, simulação e desenvolvimento de algoritmos (Mathworks, 2023).

A interface gráfica do *MATLAB* facilita a representação visual de dados e resultados, contribuindo para uma compreensão mais intuitiva e eficaz dos problemas abordados. Além de sua estrutura central robusta, o *MATLAB* destaca-se pela extensa coleção de *toolboxes* especializadas, que ampliam ainda mais suas capacidades e adaptam o *software* a uma variedade de domínios específicos. Os *toolboxes* oferecem conjuntos de funções, algoritmos e recursos dedicados a áreas como processamento de sinais, processamento de imagens, controle de sistemas dinâmicos, estatísticas e muitas outras disciplinas.

A *toolbox* de Redes Neurais Artificiais, por exemplo, proporciona ferramentas avançadas para o *design*, treinamento e implementação de redes neurais em projetos de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Essa abordagem modular e expansível, característica dos *toolboxes* do *MATLAB*, confere aos usuários a flexibilidade de adaptar a plataforma às demandas específicas de seus projetos, consolidando o *MATLAB* como uma ferramenta essencial e abrangente para a comunidade técnica e científica (Mathworks, 2023).

A Seção 3 descreve a metodologia adotada neste trabalho, incluindo a coleta e validação dos dados de temperatura no estator do motor, a instalação do sensor DS18B20, a programação no Arduino para leitura dos dados, e sua transferência via Node-Red para planilha Excel. Esses dados foram utilizados no *MATLAB* para treinar uma Rede Neural Artificial voltada à predição de temperatura, visando à aplicação em manutenção preditiva.

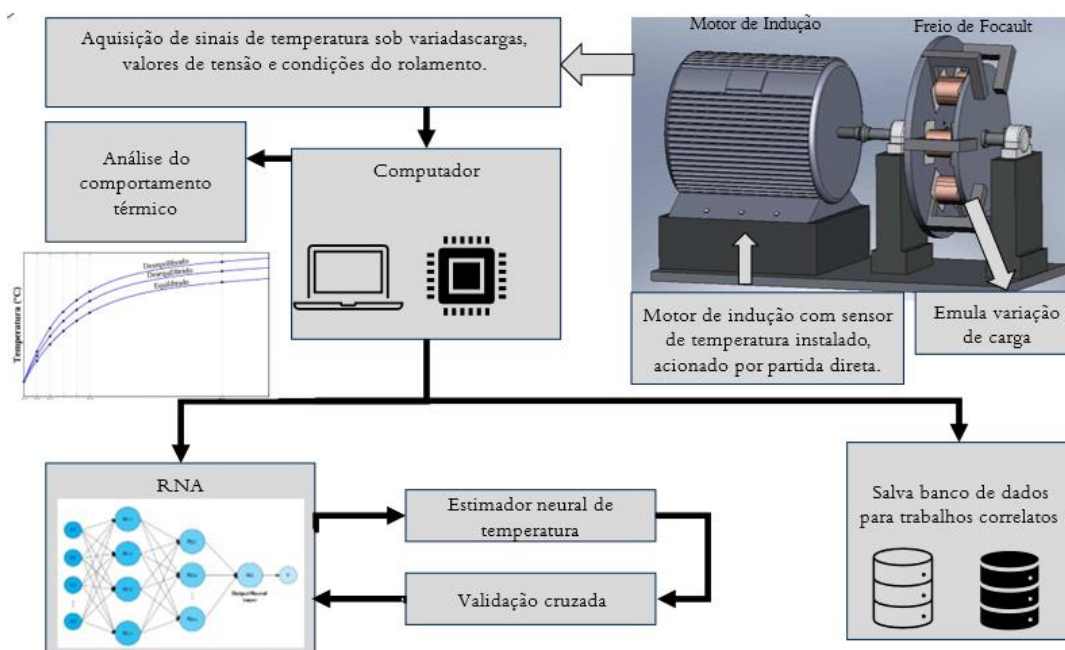
3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma estratégia para monitorar e estimar a temperatura de motores de indução trifásicos (MIT) utilizando sensores de baixo custo e redes

neurais artificiais. Para isso, uma bancada experimental foi utilizada para a coleta e validação dos dados. A Figura 9 ilustra a metodologia utilizada neste trabalho.

Na Figura 9, o sistema experimental inicia-se com a aquisição de sinais de temperatura, realizados sob diferentes condições operacionais, variando-se cargas, tensões e estados do rolamento. Esses dados são coletados de um motor de indução instrumentado com sensores de temperatura e acoplado a um freio de Foucault, que emula a variação de carga no eixo do motor. O motor é acionado em regime de partida direta, simulando condições típicas de operação industrial. Os sinais coletados são processados por um computador, que realiza a análise do comportamento térmico do motor, como ilustrado no gráfico de evolução de temperatura até o equilíbrio térmico.

Figura 9 - Fluxograma dos testes para validação do trabalho.



Fonte: Do Autor (2025).

Os dados processados alimentam dois fluxos simultâneos: um banco de dados e uma rede neural. No primeiro fluxo, os dados são armazenados em um banco de dados para futuras análises e comparações em trabalhos correlatos. No segundo

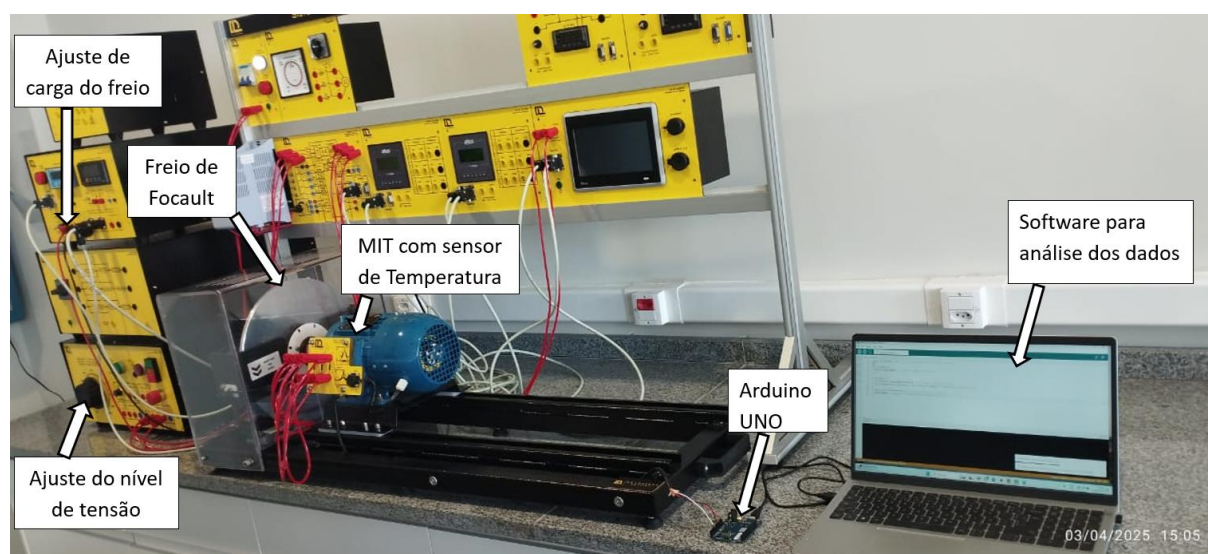
fluxo, os dados alimentam uma Rede Neural Artificial (RNA), que atua como um estimador neural de temperatura.

A rede é treinada e validada utilizando técnicas de validação cruzada, garantindo a robustez e a generalização do modelo desenvolvido. A metodologia propõe que o modelo de RNA seja utilizado para prever o comportamento térmico do motor, reduzindo a necessidade de ensaios experimentais exaustivos e permitindo a análise preditiva de falhas térmicas.

3.1 Bancada de testes

Com o objetivo de prever prováveis falhas térmicas em motores de indução trifásicos, o desenvolvimento da metodologia dessa pesquisa tem como objetivo submeter um MIT a vários testes com condições reais de trabalho, sobrecargas mecânicas, rolamento com tempo de vida útil elevado (rolamento ruim), afundamento de tensão (baixa tensão) e sobre tensão (tensão alta). Para a realização dos experimentos, foi utilizada uma bancada de testes de Máquinas Elétricas Rotativas ilustrada na Figura 10.

Figura 10 – Sistema Didático de Máquinas Elétricas e Geradoras



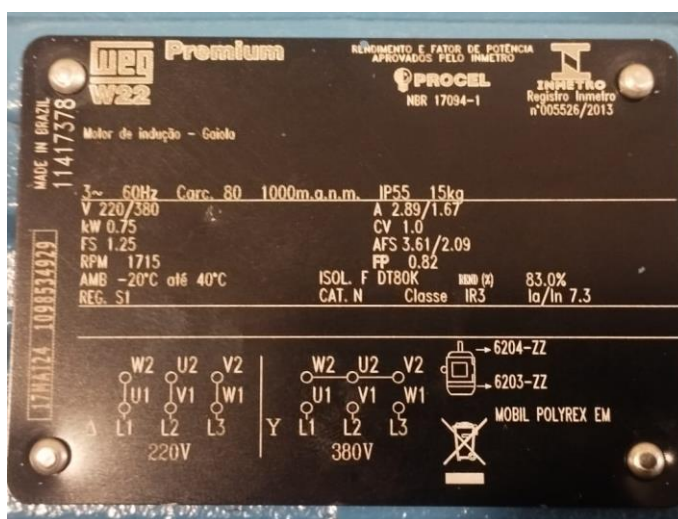
Fonte: Do Autor (2025).

A referida bancada de testes possibilita emular variações de cargas mecânicas no eixo do MIT através de um freio de *Focault*. Além do conjugado mecânico, também é possível testar o motor com um variador de tensão (*Variac*), que possibilita aplicar tensões variadas no motor (menores ou maiores do que a tensão nominal de trabalho).

Para a realização dos testes, foi utilizado um motor de indução – gaiola WEG W22 *Premium* modelo 80 com potência de 0,75 kW ou 1CV e corrente nominal de 2,89 Amperes, acionado em tensão de 220Vca. O referido motor possui um Fator de Serviço (FS) de 1,25. O FS trata-se de um valor multiplicador que indica a carga que o motor pode operar acima de suas condições nominais).

Segundo Guarnieri; Samuel Cerrutia (2017), de maneira geral, sobrecargas leves, como em torno do FS, não são tão prejudiciais para a máquina, assim como pequenos transientes de sobrecarga. O grande fator a ser levar em conta é a temperatura nos enrolamentos, se o motor apresentar ventilação deficiente, por exemplo, até o regime nominal, pode estar fazendo que a máquina exceda o limite de temperatura da classe de isolamento, essas condições diminuem muito a vida útil do MIT. Os dados do motor são ilustrados na placa de identificação da Figura 11.

Figura 11 - Placa de Identificação do MIT



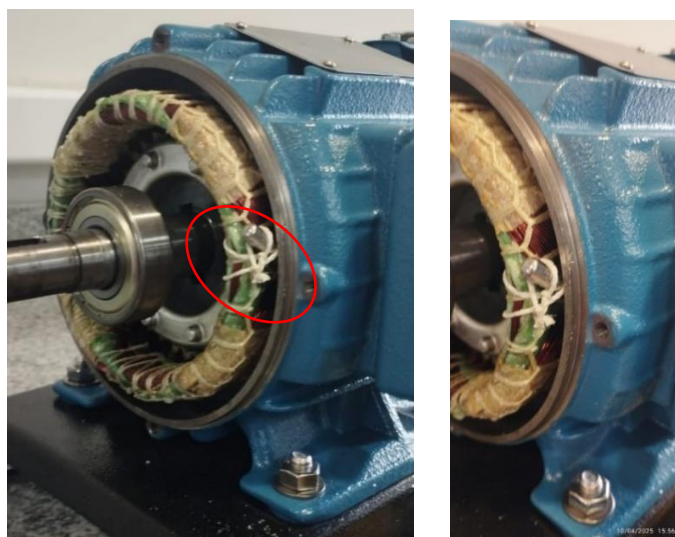
Fonte: Do Autor (2025)

Conforme o catálogo WEG (2021) o motor utiliza a classes de isolamento B (120°C). Adicionalmente, é projetado para trabalhar em um ambiente com temperatura de até 40°C em uma altitude de até 1000m. O delta T (ΔT) é a diferença de temperatura entre o bobinado do motor e a temperatura ambiente, ou seja, os motores standard com isolação B possuem um delta ΔT de 80°C. A próxima subseção apresentada os procedimentos práticos para o desenvolvimento da metodologia dessa pesquisa.

3.2 Aquisição de dados

A aquisição dos valores de temperatura foi realizada com um sensor de temperatura - modelo DS18B20, instalado diretamente nas bobinas do estator do MIT. Para obter acesso as bobinas, foi necessário desmontar o motor e amarrar o sensor diretamente em suas bobinas conforme ilustra a Figura 12, garantido confiabilidade e precisão nos valores obtidos.

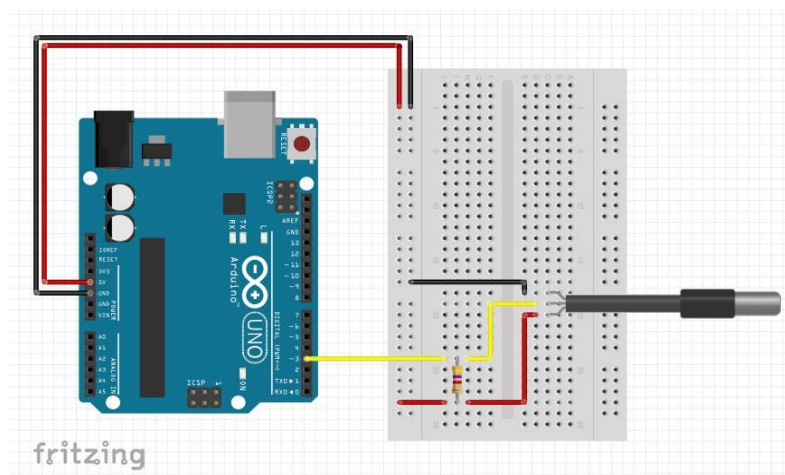
Figura 12 – Sensor de temperatura instalado nas bobinas do estator do MIT



Fonte: Do Autor (2025).

O sensor foi conectado à placa Arduino UNO pela porta digital 3, utilizando um resistor de 4K7 ohm do tipo pull-up para assegurar a comunicação 1-Wire eficiente, mantendo o sinal em nível alto mesmo na ausência de leitura. A Figura 13 apresenta o esquema de ligação.

Figura 13 – Conexão do sensor de temperatura com *hardware* Arduino Uno



Fonte: Elaborado pelo Autor (2025) no estilo do *software Fritzing*.

Através de comunicação serial o Arduino Uno envia os valores de temperatura para a interface *Node-Red*, responsável por armazenar em tabela no *software Excel*. Essa tabela foi desenvolvida em 9 colunas que definem o cada modelo de análise, e em cada análise foram coletados 1400 dados com taxa de amostragem de 1 segundo. Assim, cada teste durou aproximadamente 24 minutos.

Após cada coleta de dados foi realizada uma ventilação forçada no MIT para o retorno a temperatura ambiente. Os modelos dos testes foram divididos em situações que ocorrem normalmente nas indústrias, simulando situações variadas de carga no eixo do moto desde corrente elétrica menor que a nominal identificada na placa do MIT, quanto sobrecargas severas (corrente elétrica acima do fator de serviço estipulado para o MIT).

Ainda, ensaios experimentais foram realizados com o rolamento ruim (no fim de sua vida útil) e aplicando tensão abaixo e acima da tensão nominal de trabalho do motor conforme dados apresentados na Tabela 1, onde a primeira linha são os nomes de cada teste e as demais linhas são valores em °C coletados diretamente das bobinas.

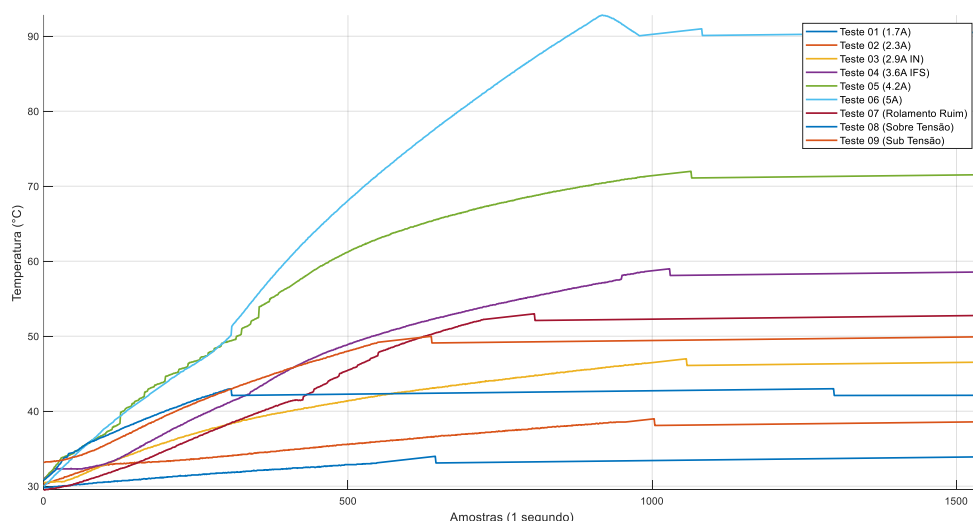
Tabela 1 – Parcial dos testes de temperatura no bobinado do MIT

Modelo de testes para análise de variação de temperatura em MIT								
1,6 Amperes	2,2 Amperes	2,9 Amperes - IN	3,6 Amperes - IFS - 125% IN	4,2 Amperes - 145% IN	5 Amperes - 172% IN	Rolamento Ruim	Afundo de tensão - 170Vca	Sobre tensão - 255Vca
29.81	30.19	30.50	30.92	30.86	30.00	29.50	30.78	30.86
29.81	30.25	30.50	30.99	30.94	30.06	29.50	30.86	30.94
29.81	30.31	30.50	31.15	31.05	30.06	29.50	30.93	31.05
29.81	30.37	30.50	31.20	31.16	30.25	29.56	30.99	31.16
29.81	30.37	30.50	31.26	31.28	30.31	29.56	31.08	31.28
29.81	30.44	30.50	31.36	31.35	30.37	29.56	31.17	31.35
29.81	30.37	30.56	31.40	31.50	30.50	29.56	31.25	31.50
29.81	30.44	30.56	31.55	31.56	30.56	29.56	31.29	31.56

Fonte: Do Autor (2025).

A planilha completa foi adicionada a programação de uma RNA em uma toolbox no *software* MATLAB. Com o objetivo de validar a coleta de dados e dar sequência a etapa de treinamento da RNA para predição de temperatura, os dados coletados e anexados em *Excel* foram plotados no *MATLAB* para se analisar a coerência do gráfico fornecido pela rede. A Figura 13 ilustra as curvas de temperatura de cada teste realizado, demonstrando variações de temperatura dependendo das condições em que o MIT foi submetido.

Figura 13 – Gráfico da temperatura em diferentes experimentos.



Fonte – Do Autor (2025).

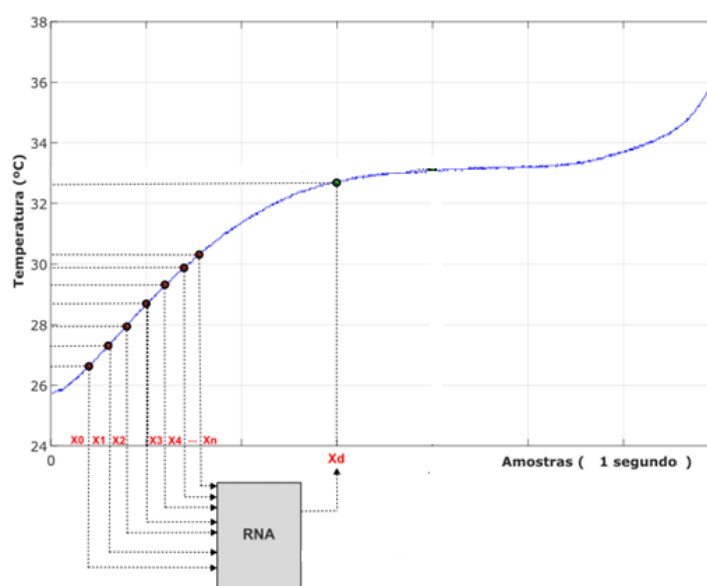
A seguir são detalhados os aspectos relacionados as topologias adotadas para o treinamento do preditor neural.

3.3 Predição de temperatura utilizando redes neurais

Este trabalho adotou o uso das redes neurais temporais com entradas deslocadas no tempo, conhecidas como Time-Delay Neural Networks (TDNN). Essas redes são arquiteturas especialmente projetadas para processar sinais sequenciais ou séries temporais, capturando a dependência temporal entre os dados. Diferentemente das redes *feedforward* tradicionais, a TDNN introduz deslocamentos (*delays*) explícitos nas entradas, permitindo que o modelo considere não apenas o valor atual do sinal, mas também uma janela de valores passados.

Essa característica torna a TDNN particularmente eficaz na modelagem de fenômenos dinâmicos, como o comportamento térmico de motores elétricos ou o reconhecimento de padrões em sinais de voz, uma vez que ela consegue identificar relações de causa e efeito distribuídas ao longo do tempo. A estruturação da rede neural utilizada está apresentada na Figura 14,

Figura 14 – Metodologia do preditor neural



Fonte: Do Autor (2025).

Na topologia da Figura 14, os valores de x_0, x_1, x_2, x_3, x_4 até x_n representam o intervalo de amostras de entrada selecionadas para o treinamento da rede. Esse número representa 67% dos valores da coleta antes da temperatura em regime permanente, ou seja, o número indicado para treinamento de uma rede neural é 67% da parte transitória da temperatura. O valor após o bloco de Rede Neural Artificial (RNA) nomeado X_d é o valor de predição da rede, esse valor pode ser determinado no código dependendo da posição desejada para análise.

A topologia utilizada permite alterações de parâmetros que impactam no seu desempenho, alguns exemplos são: o número de camadas da rede, o número de neurônios de cada camada, o método de aprendizado utilizado, o coeficiente de aprendizado, o número de épocas e o erro quadrático médio (MSE), entre outros.

Após a coleta os dados foram estruturados e separados em seus determinados arquivos (Dados_temp (todos os dados coletados), Dados_Treinamento (% dos dados coletados separada para treinamento) e D (que são os resultados desejados para predição da rede). A seguir são apresentadas as tabelas com os parâmetros utilizados nos treinamentos da RNA.

Quadro 1 - Topologia n° 1 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	2	
N° de Neurônios camada 1	6	
N° de Neurônios camada 2	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente	
Função de Ativação camada 1	tansig	
Função de Ativação camada 2	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-8	
Coeficiente de aprendizado	0.001	
N° de dados para treinamento da rede	569 amostras ou 67%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 2 - Topologia n° 2 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	4	
N° de Neurônios camada 1	75	
N° de Neurônios camada 2	5	
N° de Neurônios camada 3	2	
N° de Neurônios camada 4	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	tansig	
Função de Ativação camada 2	tansig	
Função de Ativação camada 3	tansig	
Função de Ativação camada 4	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-8	
Coeficiente de aprendizado	0.01	
N° de dados para treinamento da rede	569 amostras ou 67%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 3 - Topologia n° 3 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	150	
N° de Neurônios camada 2	50	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-6	
Coeficiente de aprendizado	0.01	
N° de dados para treinamento da rede	569 amostras ou 67%	

Fonte: Do Autor (2025)

Quadro 4 - Topologia n° 4 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	300	
N° de Neurônios camada 2	100	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-6	
Coeficiente de aprendizado	0.01	
N° de dados para treinamento da rede	569 amostras ou 67%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 5 - Topologia n° 5 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	10	
N° de Neurônios camada 2	8	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-6	
Coeficiente de aprendizado	0.001	
N° de dados para treinamento da rede	349 amostras ou 38%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 6 - Topologia n° 6 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	15	
N° de Neurônios camada 2	4	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-8	
Coeficiente de aprendizado	0.01	
N° de dados para treinamento da rede	349 amostras ou 38%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 7 - Topologia n° 7 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	150	
N° de Neurônios camada 2	50	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-6	
Coeficiente de aprendizado	0.001	
N° de dados para treinamento da rede	349 amostras ou 38%	

Fonte: Do Autor (2025).

Quadro 8 - Topologia n° 8 para o estimador neural

Arquitetura	PMC	
Treinamento	"traingdm"	
N° de Camadas	3	
N° de Neurônios camada 1	15	
N° de Neurônios camada 2	5	
N° de Neurônios camada 3	1	
Algoritmo de Treinamento	Gradiente Descendente com Momentun	
Função de Ativação camada 1	logsig	
Função de Ativação camada 2	logsig	
Função de Ativação camada 3	purelin	
N° de Épocas	5000	
Erro Quadrado Médio	1e-6	
Coeficiente de aprendizado	0.001	
N° de dados para treinamento da rede	297 amostras ou 33%	

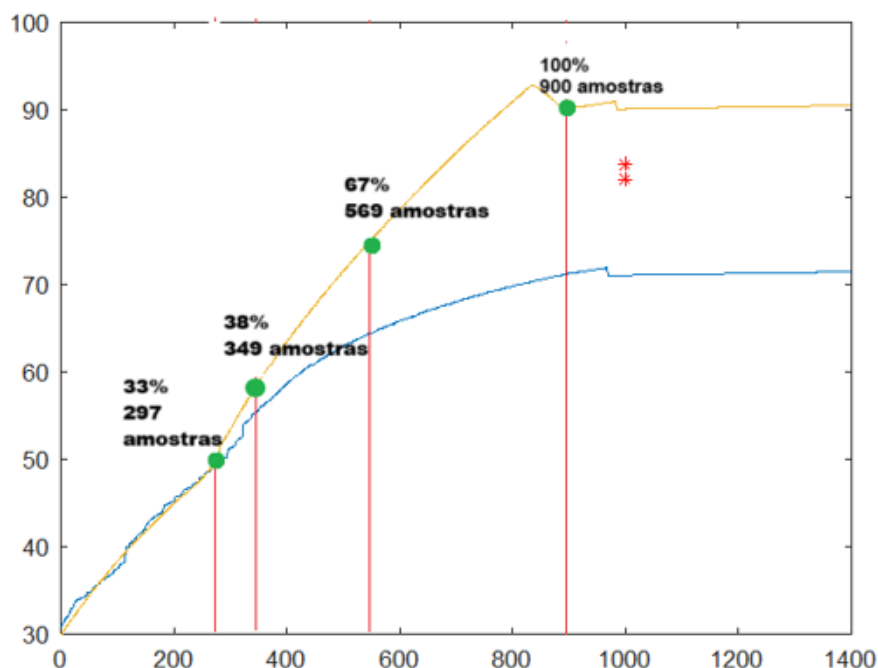
Fonte: Do Autor (2025).

Os quadros citados acima são as topologias utilizadas para os treinamentos que tiveram os melhores resultados para predição de temperatura desejada. A Figura 15 detalha o janelamento dos dados para treinamento. Durante os ensaios, foram coletadas 1400 amostras, dentre as quais, o regime transitório representa aproximadamente 900 amostras, ou seja, os 100% dos dados utilizados.

Todas as topologias citadas foram treinadas para que a rede estime a temperatura na amostra número 1000 no gráfico. O sistema de aquisição de dados foi estipulado para registrar uma amostra por segundo, assim sendo, o estimador neural é capaz de prever a temperatura em um tempo de 16 minutos e 40 segundos à frente.

Para as topologias 1, 2, 3 e 4 foram utilizadas 569 amostras (67%) que representam 9 minutos e 29 segundos de coleta de dados. As topologias 5, 6 e 7 utilizaram 349 amostras (38%) que representam 5 minutos e 49 segundos de coleta de dados. Por fim, a topologia 8 utilizou 297 amostras (33%) que representa 4 minutos e 57 segundos de coleta de dados.

Figura 15 – Gráfico demonstrativo da utilização dos dados coletados



Fonte: Do Autor (2025).

As porcentagens de amostras separadas para os treinamentos foram retiradas somente do período da temperatura em regime transitório. Assim, foram consideradas 900 amostras (15 minutos de teste) o total de 100% e não as 1400 amostras totais que têm um tempo de teste de 23 minutos e 20 segundos.

A próxima sessão apresenta a discussão dos resultados obtidos com os treinamentos listados nos quadros 1 a 8, com o intuito de apresentar o modelo com melhor desempenho e resultado, porém, destacando as qualidades dos demais testes, tendo em vista que todos os modelos acima têm potencial para serem utilizados de maneira efetiva, trazendo resultados satisfatórios.

Vale destacar que os gráficos apresentados nos resultados são as curvas de temperatura dos testes 5 (4,2Amperes-145%-IN) e 6 (5Amperes-172%-IN) e foram utilizados em todas as topologias.

4. APRESENTAÇÃO DE DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta análise dos resultados, serão detalhadas as diferenças entre os treinamentos descritos na seção de Metodologia. Para sistemas de primeira ordem, diversas referências apontam a utilização de 2/3 ou 67% dos dados como um valor adequado para a modelagem do sistema por meio de sua função de transferência. O presente estudo visa encontrar configurações de rede que tragam resultados satisfatórios com uma quantidade menor de dados utilizados para treinamento.

O quadro 9 ilustra as configurações das quatro topologias da rede (Top. 1 – 4) utilizada como preditor neural. Nessas topologias foram utilizadas 67% dos dados para o treinamento da rede.

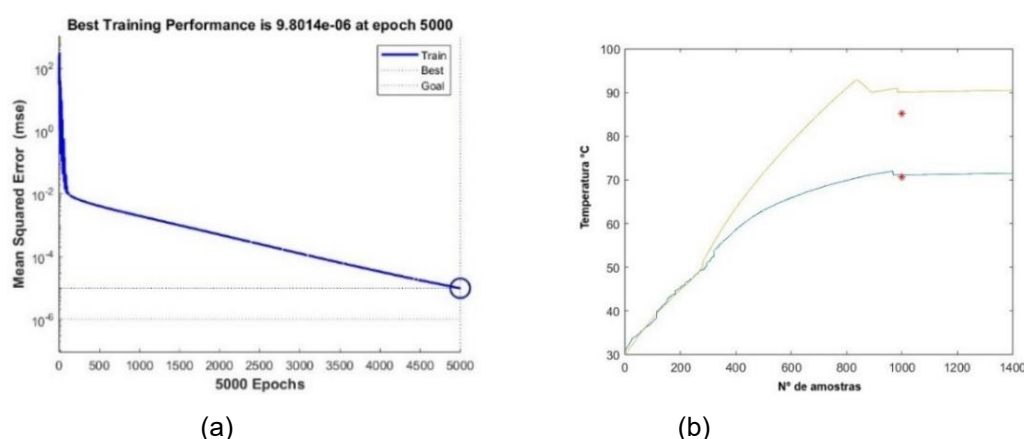
Quadro 9 – Comparação de estruturas da RNA

	Top. 1	Top. 2	Top. 3	Top. 4
Arquitetura	PMC	PMC	PMC	PMC
Treinamento	“traingdm”	“traingdm”	“traingdm”	“traingdm”
Nº de Camadas	2	4	3	3
Nº de Neurônios camada 1	6	75	150	300
Nº de Neurônios camada 2	1	5	50	100
Nº de Neurônios camada 3		2	1	1
Nº de Neurônios camada 4		1		
Algoritmo de Treinamento	GD	GD+M	GD+M	GD+M
Função de Ativação camada 1	tansig	tansig	logsig	logsig
Função de Ativação camada 2	purelin	tansig	logsig	logsig
Função de Ativação camada 3		tansig	purelin	purelin
Função de Ativação camada 4		purelin		
Nº de Épocas	5000	5000	5000	5000
Erro Quadrado Médio	1e-8	1e-8	1e-6	1e-6
Coeficiente de aprendizado	0.001	0.01	0.01	0.01
Qtde. dados para treinamento	67%	67%	67%	67%

Fonte: Do Autor (2025)

Comparando as topologias utilizadas nos treinamentos, a que apresentou o melhor resultado foi a topologia 4 que teve uma taxa de erro de 0,1195%. O treinamento foi interrompido na época 5000 com um erro final de 9.9427×10^{-7} o que atinge a meta definida de 1×10^{-6} , com um valor da saída Y muito próximo ao valor desejado D com assertividade de 99,8895% como ilustra a Figura 15. Os demais treinamentos também apresentaram valores esperados.

Figura 15 – Topologia 4: (a) performance; (b) validação

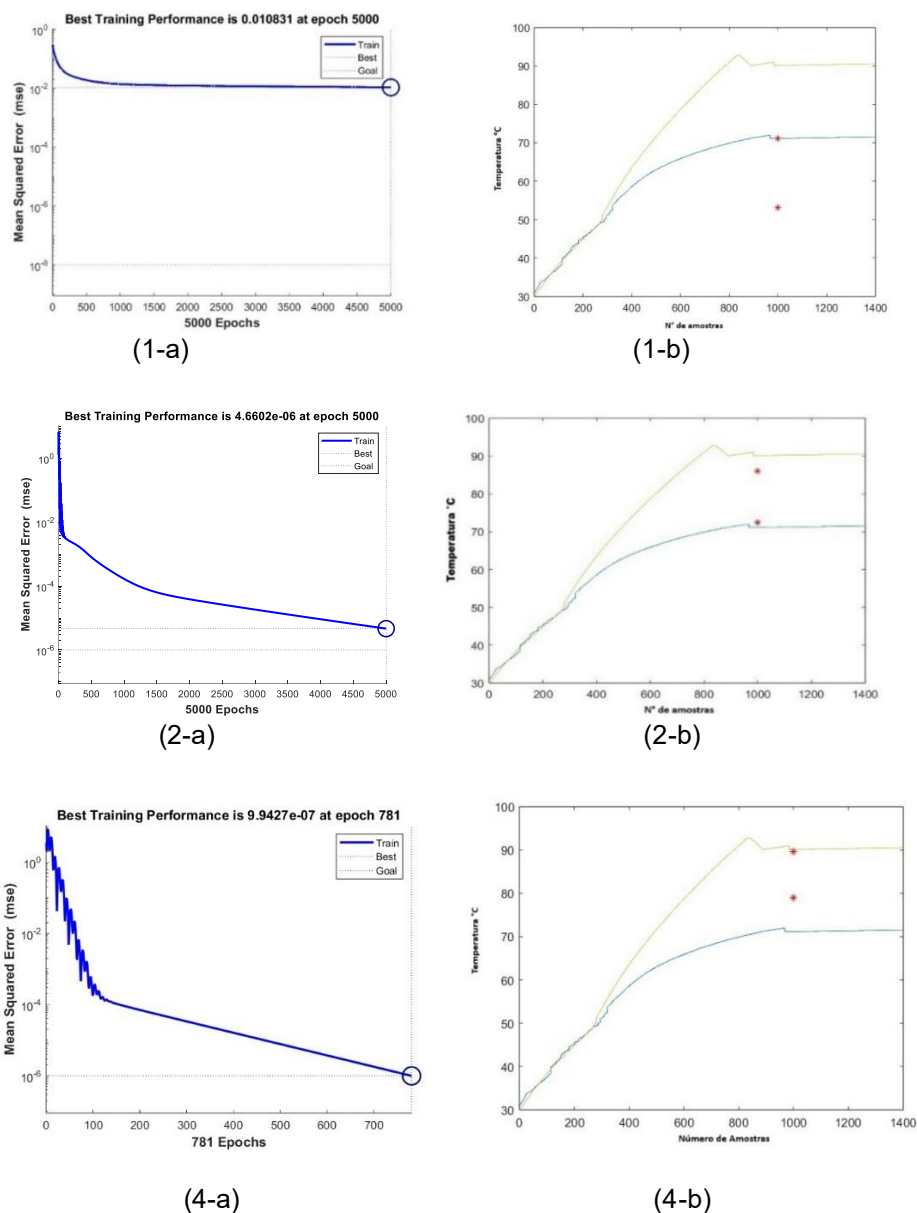


Fonte: Do Autor (2025).

A Figura 16 apresenta os gráficos de desempenho e validação das topologias 1, 2 e 4 do preditor neural. As subfiguras (1-a), (2-a) e (4-a) mostram a evolução do erro quadrático médio (MSE) ao longo das épocas de treinamento. Observa-se que todas as topologias convergiram, embora a topologia 4 tenha alcançado o menor erro ($\approx 8,9 \times 10^{-6}$), indicando melhor desempenho entre as três.

Nas subfiguras (1-b), (2-b) e (4-b), a validação da estimativa de temperatura mostra a aproximação entre os valores reais e os preditos pela rede. A topologia 4 (4-b) apresenta uma curva predita mais aderente aos dados reais, com menor dispersão dos pontos de erro, o que reforça sua maior assertividade. Já as topologias 1 e 2 demonstram maior desvio entre as curvas, especialmente em regiões de temperatura mais elevada, indicando menor precisão preditiva.

Figura 16 – Topologia 1, 2 e 3: (a) performance; (b) validação



Fonte: Do Autor (2025).

Nas subfiguras (1-b), (2-b) e (4-b), a validação da estimativa de temperatura mostra a aproximação entre os valores reais e os preditos pela rede. A topologia 4 (4-b) apresenta uma curva predita mais aderente aos dados reais, com menor dispersão dos pontos de erro, o que reforça sua maior assertividade. Já as topologias 1 e 2 demonstram maior desvio entre as curvas, especialmente em regiões de temperatura

mais elevada, indicando menor precisão preditiva. O Quadro 10 ilustra os resultados de assertividade e taxa de erro das topologias.

Quadro 10 – Resultados da Rede Neural utilizando 67% dos dados para o treinamento.

	D-71,1310	D-90,1150	Assertividade 1	Assertividade 2	Erro 1	Erro 2
Top. 1	Y 70,0873	Y-53,1851	98,9563%	63,0701%	1,0437%	36,9299%
Top. 2	Y-73,6450	Y-86,4062	97,486%	96,2912%	2,514%	3,7088%
Top. 3	Y-74,9040	Y-89,6237	96,227%	99,5087	3,773%	0,4913
Top. 4	Y-71,0205	Y-85,3286	99,8895%	95,2136%	0,1105%	4,7864%

Fonte: Do Autor (2025).

No Quadro 10: D são os valores desejados; Y são os valores obtidos com o treinamento; Assertividade 1 e erro 1 serão referentes à linha azul do gráfico; e assertividade 2 e erro 2 à linha laranja, demonstrando a eficiência e precisão dos treinamentos.

Na sequência, são apresentadas as topologias e os resultados obtidos utilizando o número de dados para treinamento menor que o normalmente utilizado, como mostra o Quadro 11. Os treinamentos a seguir apresentaram resultados satisfatórios, com destaque para a topologia 8, que conseguiu bons resultados utilizando apenas 33% de dados para treinamento, como mostra a Figura 17.

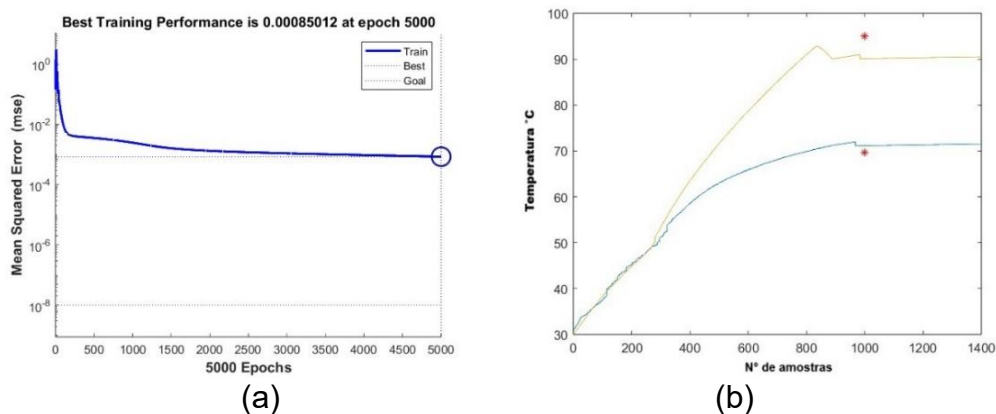
Quadro 11 – Comparação de estruturas da RNA

	Top. 5	Top. 6	Top. 7	Top. 8
Arquitetura	PMC	PMC	PMC	PMC
Treinamento	"traingdm"	"traingdm"	"traingdm"	"traingdm"
Nº de Camadas	3	3	3	3
Nº de Neurônios camada 1	10	15	150	15
Nº de Neurônios camada 2	8	4	50	5

N° de Neurônios camada 3	1	1	1	1
N° de Neurônios camada 4				
Algoritmo de Treinamento	GD	GD+M	GD+M	GD+M
Função de Ativação camada 1	logsig	logsig	logsig	logsig
Função de Ativação camada 2	logsig	logsig	logsig	logsig
Função de Ativação camada 3	purelin	purelin	purelin	purelin
Função de Ativação camada 4				
N° de Épocas	5000	5000	5000	5000
Erro Quadrado Médio	1e-6	1e-8	1e-6	1e-9
Coeficiente de aprendizado	0.001	0.01	0.001	0.001
Qtde. dados para treinamento	38%	38%	38%	33%

Fonte: Do Autor (2025).

Figura 17 – Topologia 8: (a) performance; (b) validação



Fonte: Do Autor (2025)

Os testes 5, 6, 7 e 8 atingiram o limite de épocas estipulados para finalizar o treinamento, entretanto, demonstraram eficiência e precisão mesmo com o número de dados muito menor que o recomendado pelas literaturas para os treinamentos. O Quadro 12 ilustra os resultados de assertividade e taxa de erro das topologias.

Quadro 12 – Resultados da Rede Neural utilizando 38% e 33% dos dados para o treinamento.

	D-71,1310	D-90,1150	Assertividade 1	Assertividade 2	Erro 1	Erro 2
Top. 5	Y- 70,6260	Y- 85,1915	99,495%	95,0765%	0,0505%	4,9235%
Top. 6	Y- 74,3773	Y- 87,5613	96,7537%	97,4463%	3,2463%	2,5537%
Top. 7	Y- 71,6814	Y- 70,7071	99,4496%	80,5921%	0,5504%	19,4097%
Top. 8	Y- 69,7113	Y- 93,9340	98,5803%	96,181%	1,4197%	3,819%

Fonte: Do Autor (2025)

Ao analisar todos os dados apresentados percebe-se que a topologia com o melhor resultado foi a Rede 4 que apresentou 99,8895% e 95,136% de assertividade, entretanto utilizando o valor total de épocas para finalizar seu treinamento. Outra topologia em destaque é a Rede 3 pois apresentou uma assertividade de 96,227% e 99,5087% com apenas 15,62% ou 781 do número de épocas estipulado para treinamento, isso significa que a rede estimou o valor de temperatura desejado muito mais rápido que os demais treinamentos que utilizaram 67% do total de dados para realizar o treinamento.

Outro resultado em destaque foi a topologia 8, que mesmo utilizando o valor máximo de épocas para treinamento conseguiu taxa de assertividade e erro satisfatórios para essa pesquisa utilizando apenas 33% de dados para treinamento da rede sem reduzir drasticamente a precisão dos resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste trabalho consiste na implementação de uma metodologia para um estimador de temperatura em motores de indução trifásicos utilizando redes neurais artificiais. O estudo partiu das coletas dos dados de temperatura submetendo o MIT em diversas condições de trabalho, desde condições normais á condições adversas (sobrecargas e nível de tensão não compatível com o motor), uma estrutura foi montada para aquisição e planilhamento dos dados coletados. Com os dados

estruturados foram geradas topologias para treinamento e validação da proposta dessa pesquisa.

Através dos resultados apresentados pelas redes evidencia-se que existem diversas topologias que podem ser aplicadas para predição de temperatura e que redes neurais artificiais podem ser utilizadas na prevenção de falhas de MIT, os treinamentos mostraram valores de predição satisfatórios, obtendo percentuais de assertividade de até 99,8895 %, proporcionando uma nova alternativa para a aplicação em sistemas de identificação de falhas em motores elétricos. Nota-se que mesmo reduzindo os níveis de processamento da rede através da redução dos dados de entrada, a assertividade se mantém elevada, na faixa de 98,5803%.

Entretanto, algumas limitações foram observadas no decorrer do estudo. A principal delas diz respeito ao nível de ruído nos dados coletados, especialmente em situações em que o motor era alimentado por inversores de frequência, o que compromete parcialmente a estabilidade da leitura do sensor. Além disso, o processo de treinamento das RNAs depende de uma etapa prévia de organização dos dados, o que requer conhecimento técnico e tempo para ajuste fino dos parâmetros da rede. Outra limitação está relacionada à restrição do conjunto de testes a um único modelo de motor, o que pode limitar a generalização do modelo para diferentes aplicações industriais.

Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se a adoção de técnicas de filtragem de sinais mais robustas para mitigar o ruído induzido por acionamentos eletrônicos, como filtros digitais passa-baixa adaptativos. Além disso, recomenda-se a expansão do banco de dados com diferentes modelos e potências de MITs, de modo a treinar redes mais generalistas. Outro caminho promissor é o uso de inteligência artificial embarcada, com a implementação de modelos leves diretamente em microcontroladores, utilizando bibliotecas de aprendizado de máquina otimizadas para dispositivos de borda (edge computing). Por fim, a aplicação de redes neurais convolucionais ou recorrentes, bem como a comparação com algoritmos alternativos

como máquinas de vetor de suporte (SVM), pode ampliar o escopo e a eficiência da predição térmica em cenários industriais mais complexos.

REFERÊNCIAS

AVOLIO, Edwin. **Uma contribuição ao estudo do comportamento térmico e do desempenho elétrico de motores de indução com rotor em gaiola**. 1992. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1992. Orientador: Ernesto Ruppert Filho. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/42205>. Acesso em: 20 de abr. 2025.

BARBARA, Gustavo Vendrame. **Um estudo sobre multissensoriamento no diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos**. 2023. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Proκόpio, 2023. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31972>. Acesso em: 20 abr. 2025.

BONNETT, A. H. AND G. C. SOUKUP. Causes and analysis of stator and rotor failures in three-phase induction motors. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, vol. 28, no. 4, pp. 921–937. 1992.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013

CHOUDHARY, A. et al. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 26, n. 4, p. 1221–1238, 2019.

DONOLO, P.; BOSSIO, G.; DE ANGELO, C. Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slots. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 52, n. 5, p. 2024–2030, 2011.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais: princípios e prática**. Tradução de Luiz Eduardo Borges de Almeida. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

KARMAKAR, Subrata; CHATTOPADHYAY, Surajit; MITRA, Madhuchhanda. Induction motor fault diagnosis: approach through current signature analysis. 1. ed. Singapore: **Springer**, 2016. 161 p.

KUMAR, P. N.; VINOTHRAJ, C.; ISHA, T. B. Effect of wear and tear bearing fault in induction motor drives using FEM. In: **2018 IEEE International Conference on**

Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018, Chennai. Proceedings [...]. [S.I.]: IEEE, 2018.

LIU, Yuqing; CHEN, Zaigang; GE, Xin; WANG, Kaiyun. Surface wear evolution of traction motor bearings in vibration environment of a locomotive during operation. **Science China Technological Sciences**, [S.I.], v. 65, n. 2, p. 358–370, 2022. ISSN 1869-1900.

LOPES, Tiago Drummond; GOEDTEL, Alessandro; BRONIERA JUNIOR, Paulo; GRACIOLA, Clayton Luiz; MIZUYAMA, Daniel. Uma abordagem neural no monitoramento preditivo de temperatura num motor de indução trifásico. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI)**, 14., 2013, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: SBAI, 2013. p. 1–6. Disponível em: <https://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/5487.pdf>. Acesso em: 19 de abr. 2025.

MATHWORKS. **What Is MATLAB?** Disponível em: <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>. Acesso em: 5 abr. 2023.

PASSE, Fernando Ferreira; VASCONCELOS, Vanessa Cristiny Rodrigues; CANESCHE, Michael; FERREIRA, Ricardo. Perspectivas sobre o uso do Node-Red na educação em IoT. **International Journal of Computer Architecture Education**, [S.I.], v. 6, n. 1, p. 46–51, 2017.

PINHEIRO, Romário de Mesquita. **Inteligência artificial e imagens termográficas infravermelha para avaliação de secagem de sementes**. 2022. 100 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br/xmlui/handle/prefix/13951>. Acesso em: 12 de abr. 2025.

QI, Qinglin; TAO, Fei. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. **IEEE Access**, v. 6, p. 3585–3593, 2018.

ROBLES, E. et al. Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage elimination in electric motor drive systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 140, p. 110746, 2021.

ROCHA, Lucas Vinícius da Silva. **Automação residencial: microcontrolador Arduino através de uma aplicação web**. 2020. Monografia (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília (UniCEUB), Brasília, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/prefix/15101>. Acesso em: 21 de abr. 2025.

SILVA, Ivan Nunes da; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogério Andrade. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático**. São Paulo: Artliber Editora, 2010. 399 p.

SILVA, Paulo Henrique de Oliveira. Sistema de segurança de tranca de porta e controle de acesso. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Centro Universitário de Brasília (UnICEUB), Brasília, 2013. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/4916>. Acesso em: 14 de abr. 2025

SUETAKE, Marcelo. **Sistemas inteligentes para monitoramento e diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos**. 2012. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Orientador: Ivan Nunes da Silva. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-26062012-164520/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

TELES, Elaine. **Arduino: O que é? Para que serve? Quais as possibilidades?** [S. l.], 22 set. 2016. Disponível em: <https://medium.com/nossa-coletividade/arduino-o-que-%C3%A9-pra-que-serve-quais-as-possibilidades-efbd59d33491/> Acesso em: 15 de mar. 2025.

Toliyat, H. A. and G. B. Kliman. **Handbook of Electric Motors**. New York: Marcel Dekker. 2004



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

SISTEMA DE DETECÇÃO DE ATAQUE EM REDES INDUSTRIAIS QUE UTILIZAM PROFINET

Oswaldo Felipe da Silva Costa e Wesley Candido da Silva*

RESUMO

Este artigo busca detalhar o desenvolvimento, aplicabilidade e análise de um sistema de detecção de ataques cibernéticos em redes industriais utilizando o protocolo *PROFINET*. Ao longo do estudo, foi simulado um ambiente industrial utilizando CLP, IHM e uma bancada experimental, configurados a partir do software TIA Portal. Foi realizada coleta de tráfegos de dados com o *sniffer* de rede *Wireshark*, analisando as condições normais e anômalas, gerado por um disparador de ataque do tipo *ARP Spoofing*, implementado por meio da ferramenta *Ettercap* operando em plataforma Kali Linux. A partir da coleta, foi elaborado um *Dataset*, posteriormente submetido a um pré-processamento, normalização de dados e aplicado a um modelo de *Machine Learning* por meio do algoritmo *Random Forest*, desenvolvido no ambiente *MATLAB*, gerando métricas para avaliar o desempenho nos sistemas desenvolvidos. O resultado apresentado foi satisfatório, pois todas as métricas alcançaram altos valores de assertividade, evidenciando um modelo de classificação robusto e equilibrado, atendendo à expectativa de eficácia do sistema.

Palavras-chave: Detecção de Ataques; Indústria 4.0; Machine Learning; Profinet.

ATTACK DETECTION SYSTEM ON INDUSTRIAL NETWORKS USING PROFINET PROTOCOL ABSTRACT

This article seeks to detail the development, applicability and analysis of a system for detecting cyberattacks in industrial networks using the *PROFINET* protocol. Throughout the study, an industrial environment was simulated using PLC, HMI and an experimental bench, configured from the TIA Portal software. Data traffic was collected with the *Wireshark* network *sniffer*, analyzing the normal and anomalous conditions, generated by an *ARP Spoofing* attack trigger, implemented through the *Ettercap* tool operating on Kali Linux platform. From the collection, a Dataset was elaborated, later submitted to pre-processing, data normalization and applied to a *Machine Learning* model through the *Random Forest* algorithm, developed in the *MATLAB* environment, generating metrics to evaluate the performance in the developed systems. The result presented was satisfactory, as all metrics achieved high values of assertiveness, evidencing a robust and balanced classification model, meeting the expectation of effectiveness of the system.

Key words: Attack Detection; Industry 4.0; Machine Learning; Profinet.

* Autor correspondente (e-mail): wesley.candido@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

A indústria 4.0 é uma expansão na comunicação, automação moderna, controle, monitoramento de máquinas, sistemas em processos produtivos e manufatura (Turcato, 2020). Seu conceito teve início em 2011 após um evento em Hannover, na Alemanha, no qual houve uma proposta tecnológica que busca conciliar produtividade e competitividade. A finalidade do evento foi integrar as tecnologias avançadas, tais como inteligência artificial, Big Data, robótica e sensores inteligentes, conectados por meio da internet, criando uma cadeia de valor conectada (Mota, *et al.*, 2022). Diante desse contexto, compreende-se a necessidade de atender às demandas atuais, principalmente em redes industriais.

Redes industriais são definidas como sistemas de comunicação desenvolvidos em ambientes industriais com a finalidade de integrar os dispositivos da IoT (Internet das Coisas), possibilitando a coleta, o processamento e a análise de dados em tempo real, o que possibilita aprimorar a produção, diminuir custos e fortalecer a competitividade (Amo; Roepke, 2024). Assim, a rede PROFINET se destaca pela sua comunicação em tempo real e pela facilidade de identificar os problemas nas redes (Demétrio; Junior; Psiciotta, 2024).

Com a expansão na comunicação industrial, há uma vulnerabilidade e exposição de dados e informações que necessita de modelos de negócios voltados à proteção de computadores, dispositivos industriais e servidores contra os ataques cibernéticos (Mota, *et al.*, 2022). Vale destacar o mais recente relatório de detecções da *Kaspersky* (CERT 2023), que apresentou que 40,6% dos computadores em Sistemas de Controle Industrial (ICS) protegidos pela empresa foram alvo de atividades maliciosas (Nicolaio; Muranetto; Fonseca, 2023).

De acordo com a FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo), 30% das indústrias já foram alvos de ataques cibernéticos (Melo, 2025). A partir deste cenário, a pesquisa teve como motivação responder ao seguinte questionamento: Como a rede PROFINET, utilizada em ambientes industriais, pode ser protegida contra os ataques cibernéticos?

Para responder ao questionamento, o objetivo geral do estudo foi analisar o fluxo de dados na rede, identificar e classificar os ataques e inconsistências em redes industriais com protocolo PROFINET, garantindo maior segurança para os sistemas produtivos. Os objetivos específicos foram: implementar um ambiente experimental para coleta de dados sobre tentativas de ataques cibernéticos em redes PROFINET; aplicar técnicas de aprendizado de máquina, como o *Random Forest*, para a detecção de ataques em redes industriais; e avaliar a eficácia dos classificadores de aprendizado de máquina no contexto de segurança de redes industriais.

Sendo assim, para atingir os objetivos, foi proposta uma implementação de uma simulação industrial, utilizando o TIA Portal para configuração de uma rede PROFINET com CLP, IHM e esteira simulada. A coleta de dados foi realizada por meio do *Wireshark*, lendo os pacotes sem e com os ataques gerados pelo *Ethercap* à rede. Na etapa de análise, foi aplicada a técnica de aprendizado de máquina *Random Forest*, utilizando o ambiente MATLAB para treinamento, teste e avaliação do modelo. Dessa forma, o estudo buscou garantir soluções para a cibersegurança industrial, fortalecendo os processos produtivos da Indústria 4.0.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

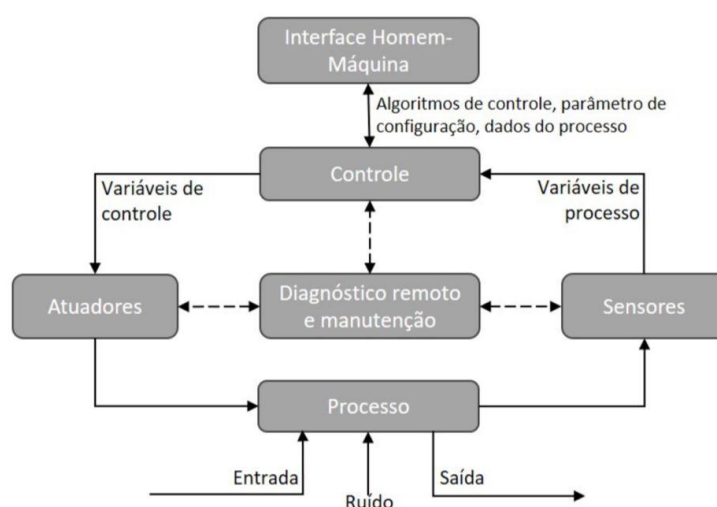
2.1 Redes industriais e os protocolos de rede

As redes industriais são essenciais para a indústria 4.0, conectando os dispositivos, sensores, máquinas de controle e possibilitando a troca de informação em tempo real e o monitoramento remoto (Amo; Roepke, 2024). Impulsionadas pela integração entre Tecnologia da Informação (TI) e Tecnologia Operacional (OT), elas são complexas com atuadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), unidades terminais remotas (RTUs) e sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) (Nicolaio, 2024).

A arquitetura PERA (*Purdue Enterprise Reference Architecture*) organiza os sistemas industriais com sensores e atuadores, responsáveis pela interação com o

processo físico. No nível acima, observam-se os CLPs e RTUs, os que realizam a coleta e o controle de dados. Em outra camada, se encontram as IHMs, aquelas que visualizam e comandam as operações. Nos níveis quatro e cinco, é a rede corporativa que gerencia as informações empresariais e dá o suporte às operações. Esse exemplo está ilustrado na **Figura 1**:

Figura 1 - Fluxo típico de uma rede OT



Fonte: Adaptado de Stouffer (2023 *apud*. Nicolaio)

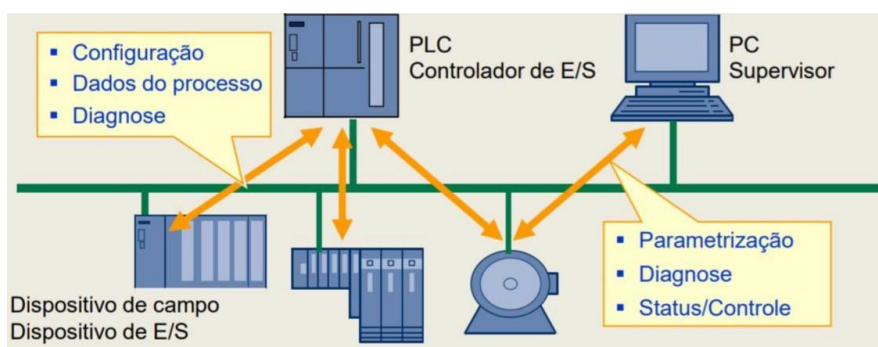
Conforme foi apresentado na **Figura 1**, evidencia-se a importância dos protocolos de rede para atender às comunicações. Turcato (2020) apontou que o protocolo *Profibus* e *Profinet*, garantem que a comunicação seja confiável e rápida em transmitir dados entre os dispositivos. Além deles, foram encontrados na literatura os protocolos *Ethernet/IP*, *Modbus TCP*, *EtherCAT*, *DeviceNet* e *MQTT* (Amo; Roepke, 2024; Demétrio; Junior; Psiciotta, 2024).

Entre eles, destaca-se o *Profinet*, uma extensão do *Profibus* desenvolvida pela *Profibus International* (PI) em 2002. Baseado na *Ethernet industrial* (IEEE 802.3) e nos padrões IEC 61158 e IEC 61784, o protocolo garante alta performance, confiabilidade e precisão em ambientes automatizados (Turcato, 2020). De acordo com Demétrio, Junior e Psicotta (2024) há funcionalidades avançadas no diagnóstico

remoto, rápida identificação de falhas, programação e atualização em tempo real sem interromper os processos produtivos.

Os Controladores E/S (também conhecidos como Controladores Lógicos Programáveis – PLC) e os Dispositivo E/S (sensores, atuadores e módulos de entrada e saída) são os principais componentes do protocolo Profinet. Também se destaca o Supervisor E/S (PC Supervisor), um software que gerencia e realiza o diagnóstico de parâmetros das unidades, conforme apresentado na Figura 2:

Figura 2 - Principais tipos de componentes do protocolo PROFINET.



Fonte: Ilário (2020).

Nesse sentido, o seu funcionamento opera com agilidade junto com outras redes industriais, com alta velocidade de transmissão e com flexibilidade (Demétrio; Junior; Psciotta, 2024). Há diversos tipos, tais como anel, estrela, árvore e linha. A sua comunicação ocorre de forma simultânea por um único cabo em serviços de TI e em tempo real por meio de gateways, convertendo dados de um protocolo para outro, sendo ajustado conforme a necessidade da aplicação. Suas tarefas exigem alto desempenho, com comunicação TCP/IP, RT (*Real Time*) e IRT (*Isochronous Real Time*), oferecendo velocidades de até 100 Mbps em um único barramento (Ilário, 2020).

O protocolo adota o modelo de comunicação *Provider/Consumer*, onde o *Provider* transmite os dados de um ou mais dispositivos, enquanto o *Consumer* recebe essas informações e controla as entradas e saídas. (Turcato, 2020). Os

autores Amo e Roepke (2024) afirmaram que esse tipo de comunicação é fundamental em ambientes industriais, pois exige alta precisão, controle de movimento, sistemas robóticos e soluções de segurança.

2.2 Cibersegurança

De acordo com Pontes (2024), a segurança é um dos maiores desafios aos desenvolvedores, diante do crescente número de ataques em ambientes industriais. O Brasil apresenta deficiência em cibersegurança, ocupando a 73ª posição no *National Cyber Security Index* (NCSI) de 2021, refletindo vulnerabilidades na prevenção e resposta a incidentes cibernéticos (Mota *et al.*, 2021).

Sendo assim, as medidas de segurança são estratégicas do modelo de negócio, que protegem os dados corporativos e dispositivos industriais e garantem a continuidade dos processos produtivos (Mota *et al.*, 2022). São necessárias atualizações constantes nas abordagens de segurança, especialmente com a introdução de tecnologias como 5G e a computação em borda. Garantir a proteção nesses novos contextos exige soluções inovadoras e adaptadas às especificidades dos sistemas industriais (Pontes, 2024).

Nesse contexto, entende-se a necessidade de garantir o desempenho da rede, considerando fatores como interferência eletromagnética, aterramento, distâncias máximas entre dispositivos e volume de dados. Porém, esse crescimento da adoção de redes industriais baseadas em Ethernet deixa vulneráveis a riscos cibernéticos com a necessidade de medidas de segurança contra acessos não autorizados, malwares e outras ameaças (Turcato, 2020). Isso ocorre por conta da ausência de camadas de proteção adequadas, como antivírus, firewalls e a dependência de sistemas legados.

Turcato (2020) destaca que uma anomalia em redes de comunicação é qualquer desvio do comportamento normal, muitas vezes utilizado como meio para comprometer o funcionamento do sistema. Tais anomalias podem indicar tentativas de acesso não autorizado ou a presença de malware.

Desse modo, há diversos tipos de ataques, tais como: *Denial of Service (DoS)* e sua versão distribuída (DDoS), *Sniffing*, *Man-in-the-Middle (MITM)* e *ARP Spoofing* (Adari; Alla, 2024). O ataque *ARP Spoofing* permite ao invasor coletar dados sigilosos e enviar respostas falsas, fazendo com que seu endereço MAC seja associado ao IP legítimo. Assim, todo o tráfego destinado ao gateway ou a outro dispositivo passa a ser redirecionado ao invasor, que pode monitorar, alterar ou bloquear as informações transmitidas (Teixeira; Clarim, 2017).

Mota *et al.* (2021) destacam a possibilidade de minimizar os riscos com o uso de roteadores com *firewall* e VPN, os quais ajudam a impedir interceptações e acessos não autorizados. Os modelos baseados em detecção de anomalias apoiados por aprendizado de máquina e Redes Neurais Profundas são importantes para detectar os comportamentos inesperados (Adari; Alla, 2024).

Nesse contexto, Adari e Alla (2024) defendem que a detecção de anomalias baseada em aprendizado de máquina é uma abordagem eficiente para identificar padrões de comportamento suspeitos em ambientes industriais. Como as comunicações em redes como PROFINET tendem a ser regulares e previsíveis, desvios abruptos podem sinalizar tentativas de intrusão ou falhas. O uso de algoritmos de aprendizado profundo permite automatizar esse processo e aplicar respostas rápidas e eficazes, garantindo a integridade, disponibilidade e segurança dos processos industriais.

De acordo com Turcato (2020), os sistemas de detecção baseados em anomalias enfrentam desafios como a necessidade de grandes volumes de dados históricos, alto custo computacional e constante atualização dos modelos. Além disso, a natureza polimórfica de muitos ataques e a existência de vulnerabilidades ainda não mapeadas dificultam a eficácia dos sistemas tradicionais baseados em assinaturas.

2.3 Aplicação de *Machine Learning*

O uso de aprendizagem de máquina aprimora o IDS, contribuindo para identificar as ameaças e tomadas de decisões automatizadas. Assim, é preciso obter os dados rotulados das características (*features*) que serão utilizadas no treinamento.

Essa ação visa melhorar a performance e reduzir a complexidade computacional ao operarem em tempo real (Nicolaio, 2024).

Os métodos de aprendizado de máquina incluem classificação supervisionada, não supervisionada e semi-supervisionada. O foco neste estudo é o aprendizado supervisionado, o qual usa dados previamente rotulados para treinar um modelo e identificar padrões anômalos na rede (Nicolaio, 2024).

Além das abordagens tradicionais de aprendizado de máquina, as Redes Neurais Profundas (*Deep Learning*) são eficazes na detecção de anomalias, principalmente quando aplicadas a grandes volumes de dados com características temporais ou estruturais complexas (Chollet, 2021). Nesse sentido, eliminam a necessidade de extração manual de atributos, aprendendo representações diretamente dos dados brutos, o que resulta em uma elevada capacidade preditiva.

No entanto, seu desempenho está relacionado à qualidade do pré-processamento dos dados, sendo fundamentais etapas como normalização, balanceamento e limpeza para garantir a eficácia na detecção de padrões anômalos. Sua resposta é rápida aos incidentes, assegurando a continuidade dos processos operacionais (Chollet, 2021).

2.4 Classificadores

Segundo Chollet (2021), classificadores podem ser vistos como transformações geométricas progressivas de dados, construídas por camadas sucessivas de redes neurais. Assim, permite que modelos aprendam representações complexas e não-lineares, superando os limites de classificadores tradicionais, principalmente em contextos como a detecção de anomalias em redes industriais.

Dessa forma, vale ressaltar os classificadores utilizados na detecção de anomalias em redes industriais: *Perceptron*, Regressão Logística, Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Árvores de Decisão. Porém, o Random Forest é adotado neste estudo como principal classificador diante de sua capacidade. Assim,

apresentam-se breves considerações sobre os outros classificadores (Raschka e Mirjalili, 2017).

O Random Forest se destaca na detecção de anomalias em redes complexas, pois, no contexto da segurança cibernética, é preciso ser capaz de modelar padrões triviais, considerando que diversos ataques se manifestam por meio de alterações sutis no comportamento de tráfego. Nesse sentido, Chollet (2021) destaca que o treinamento de redes profundas com dados capturados por sniffers possibilita identificar desvios em fluxos aparentemente legítimos.

O Random Forest é um método de aprendizado de máquina baseado em conjunto (ensemble) de árvores de decisão, onde cada árvore é treinada com subconjuntos aleatórios de dados e atributos (Raschka; Mirjalili, 2017). Destaca-se que a diversidade de árvores garante a validação *out-of-bag* e contribui para minimizar o *overfitting*, possibilitando maior estabilidade e acurácia. Além disso, possibilita também identificar a importância de cada atributo no processo de classificação. (Pontes, 2024).

A avaliação do desempenho de classificadores aplicados à detecção de intrusões em redes industriais valida sua eficácia e confiabilidade. Nesse contexto, é utilizada a Matriz de Confusão, a qual tabula os resultados de classificação em quatro categorias: Verdadeiros Positivos (VP), Falsos Positivos (FP), Falsos Negativos (FN) e Verdadeiros Negativos (VN) (Nicolaio; Muranetto; Fonseca, 2023).

2.5 Sniffer de rede

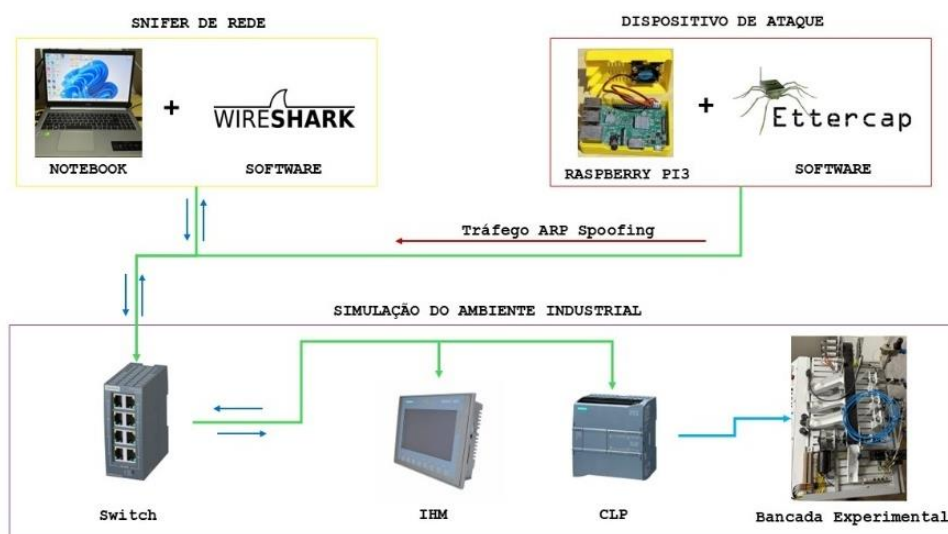
Os *sniffers de rede* são ferramentas indispensáveis para o monitoramento, diagnóstico e instrumentos de ataques. É um *software* ou *hardware* utilizado para capturar e registrar pacotes de dados trafegando em uma rede (Raschka; Mirjalili, 2017). Eles operam em modo promíscuo, permitindo que a interface de rede monitore todos os pacotes transmitidos no segmento, independentemente do destino. Assim, é explorado pelos profissionais para monitorar a integridade das comunicações e pelos atacantes para capturar informações (Adari; Alla, 2024).

Nesse contexto, o *Wireshark* permite uma captura em tempo real, análise minuciosa dos pacotes coletados, utilizando filtros por protocolos, portas ou endereços IP. Identificam-se os padrões anômalos, sendo precisa e previsível. Os dados são capturados para construção de datasets em pesquisas acadêmicas e aplicações práticas de aprendizado de máquina. Esses *datasets*, como o KDD Cup 1999 ou o HAI-22.04, são essenciais para treinar classificadores como o *Random Forest*, permitindo a identificação automatizada de padrões maliciosos com base em históricos de tráfego (Adari; Alla, 2024).

3 METODOLOGIA

O estudo experimental é de abordagem quantitativa e aplicada com a finalidade de simular um ambiente industrial com o protocolo de rede Profinet. Assim, foram analisados o tráfego da rede, gerados cenários de ataque e avaliada a eficácia de um modelo de detecção de intrusões e anomalias.

Figura 3 – Topologia Elaborada



Fonte: Do Autor (2025)

A coleta de dados foi realizada por meio de registros numéricos, possibilitando uma análise estatística e a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina.

3.1 Simulação do ambiente industrial

A simulação foi construída com uma bancada de testes representando uma linha de produção industrial, composta por uma esteira separadora de peças, programada para contar e classificar objetos de tamanhos distintos (pequeno, médio e grande).

Figura 4 – Simulação Industrial

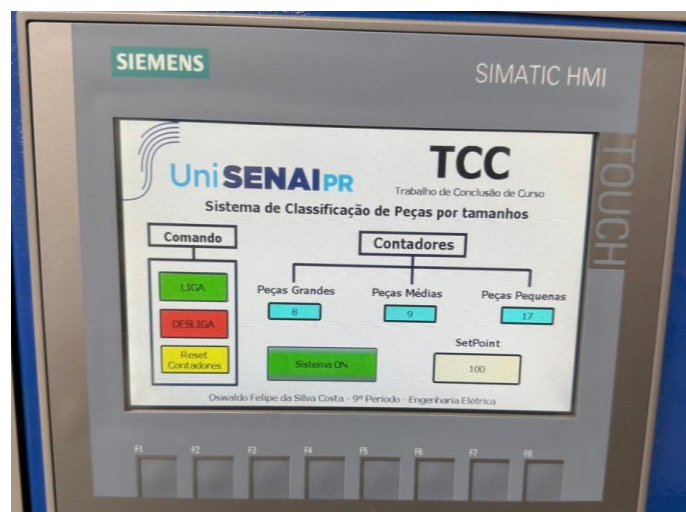


Fonte: Arquivo pessoal (2025)

O sistema de automação foi implementado utilizando um Controlador Lógico Programável (CLP) Siemens modelo S7-1200 e uma Interface Homem-Máquina (IHM) Siemens modelo *KTP700 Basic*. A **Figura 5** demonstra a interface desenvolvida, na qual é possível visualizar os comandos do sistema, status de operação, contadores de peças classificados por tamanhos e valor de referência.

Para o desenvolvimento das lógicas de controle e criação da tela de monitoramento e ajustes da bancada experimental, utilizou-se o software TIA Portal com diagrama na linguagem *Ladder*, que controla sensores e atuadores, possibilitando ao operador monitorar, comandar o sistema e as variáveis em tempo real.

Figura 5 – IHM em pleno funcionamento



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

3.2 Disparador de ataques

Na elaboração do dispositivo, foi utilizada uma *Raspberry Pi 3*, operando com sistema operacional *Kali Linux*, que fornece uma arquitetura simples e especializada em testes de intrusão e análise de segurança, pois possui nativamente ferramentas de ataque e detecção, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Execução de ferramenta *Ettercap*



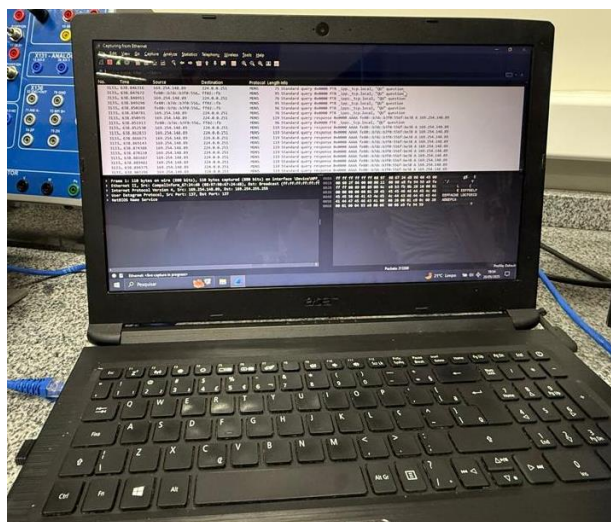
Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Entre essas possibilidades, foi selecionado o *Ettercap* para geração dos fluxos maliciosos do tipo *ARP Spoofing*, capaz de interceptar e manipular os pacotes de dados trafegados na rede entre os componentes interligados, gerando diversos tipos de falhas, como congelamentos de telas, erros de leituras, lentidão e até travamento dos comandos.

3.3 Aquisição de dados

A coleta de dados foi realizada utilizando um computador com sistema operacional Windows, com o software *Wireshark*, que atuou como *sniffer* de rede.

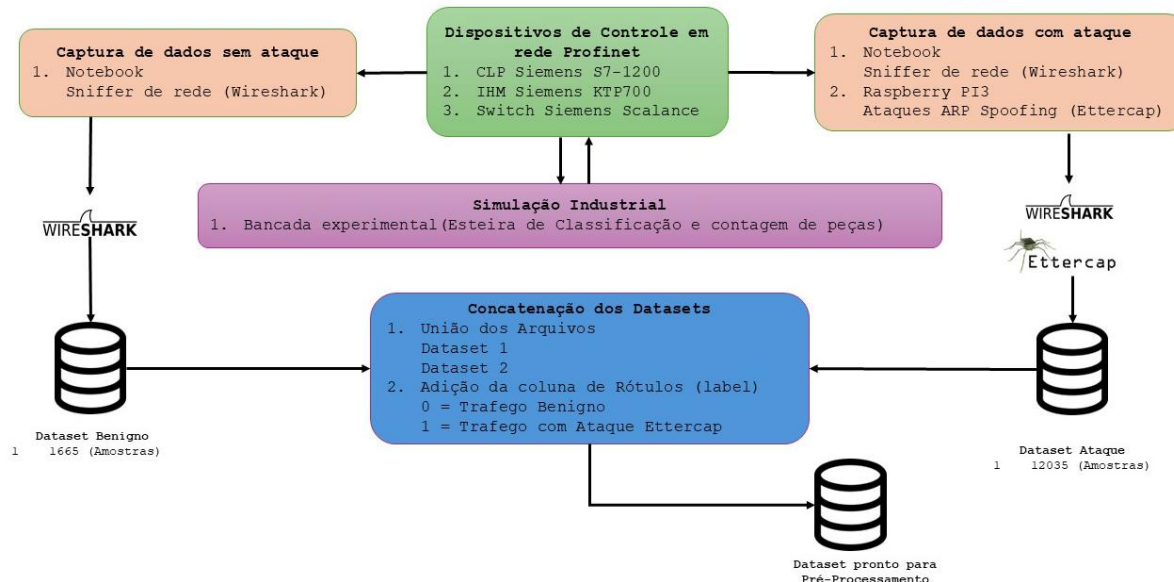
Figura 7 – Execução da ferramenta *Wireshark*



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

O *Sniffer* de rede foi configurado para capturar o tráfego da rede em dois cenários, onde no primeiro as operações de rede ocorrem sem interferências externas, tendo apenas o fluxo de dados entre CLP e a IHM, devido à simulação normal da bancada experimental de seleção e contagem de peças. Já no segundo cenário, a captura foi realizada com a aplicação dos fluxos maliciosos. Ambos os dados foram inicialmente armazenados separados em arquivos do tipo “.CSV”.

Figura 8 – Fluxograma da estrutura para captura do tráfego de dados



Fonte: Do Autor (2025)

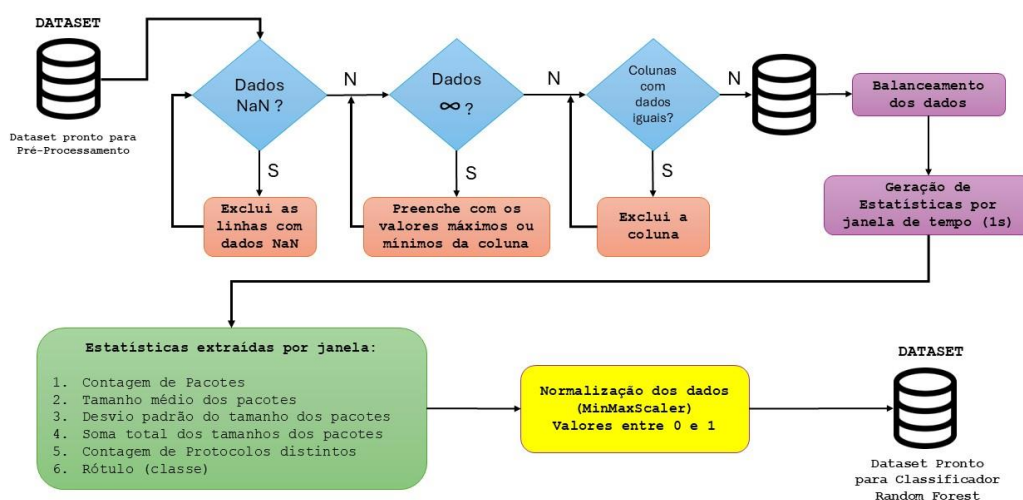
Como demonstra o fluxograma (**Figura 8**), no próximo passo foi realizada a concatenação entre os dois arquivos gerados, ou seja, a junção dos dois arquivos em um só. Além disso, foi criada uma coluna para sinalizar a classe da amostra ("*label*"), onde foi rotulado o valor '0' para os tráfegos benignos, e '1' para os tráfegos com ataque, tornando o *Dataset* apto para o pré-processamento.

3.4 Pré-processamento e *DataSet*

O pré-processamento dos dados se inicia a partir do *Dataset* "bruto", que consiste em um processo de limpeza e verificação da integridade das amostras, desenvolvido em três etapas antes de serem aplicadas ao classificador Random Forest. Na primeira etapa, ocorre a remoção de amostras que contenham valores ausentes (*NaN*), pois esses dados podem comprometer o desempenho do modelo. Na segunda etapa, são identificados valores infinitos (∞), que não são excluídos, mas sim substituídos pelo valor máximo ou mínimo da respectiva coluna, sem comprometer a estrutura da base. Na terceira etapa, são eliminadas colunas com

valores idênticos em todas as linhas, pois a ausência de variação não contribui para o aprendizado do modelo e apenas aumenta o volume de dados sem relevância. Nessa ação, possibilita-se que os dados estejam limpos e prontos para o treinamento e validação do classificador.

Figura 9 – Fluxograma da estrutura para pré-processamento de dados



Fonte: Do Autor (2025)

Com o processo de limpeza finalizado, é realizado o balanceamento dos dados, processo que ajuda a garantir que o classificador aprenderá a distinguir as situações anômalas e benignas, pois este passo equilibra a quantidade de amostra entre as duas classes. Seguindo o fluxograma (**Figura 9**), a sequência se trata da geração de estatísticas por janela de tempo, neste caso, foram seguidos intervalos fixos de 1 segundo. Desse modo, no **Quadro 1**, é listado e representado cada dado extraído:

Quadro 1 - Dados extraídos

Estatísticas gerada pela janela de tempo		
Nome da Coluna	Significado	Descrição
packet_count	Contagem de pacotes	Número de pacotes capturados durante a janela de tempo.

mean_packet_size	Tamanho médio dos pacotes	Média dos tamanhos dos pacotes trocados na janela.
std_packet_size	Desvio padrão do tamanho dos pacotes	Variação dos tamanhos dos pacotes. Um desvio elevado pode indicar comportamento irregular ou ataque.
total_packet_size	Soma total dos tamanhos dos pacotes	Quantidade total de bytes transmitidos na janela.
protocol_count	Contagem de protocolos distintos	Número de diferentes protocolos (como TCP, UDP, ARP) presentes no tráfego da janela.
label	Rótulo (classe)	Identifica se o tráfego é benigno = 0 ou ataque = 1.

Fonte: Do Autor (2025)

Sendo assim, todas as colunas são submetidas ao processo de normalização, onde é utilizada a técnica *MinMaxScaler*, que ajusta todos os dados em valores entre 0 e 1, fazendo com que todas as amostras tenham o mesmo peso, contribuindo positivamente para o treinamento do classificador.

Fórmula *MinMaxScaler*:

$$X_{normalizado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

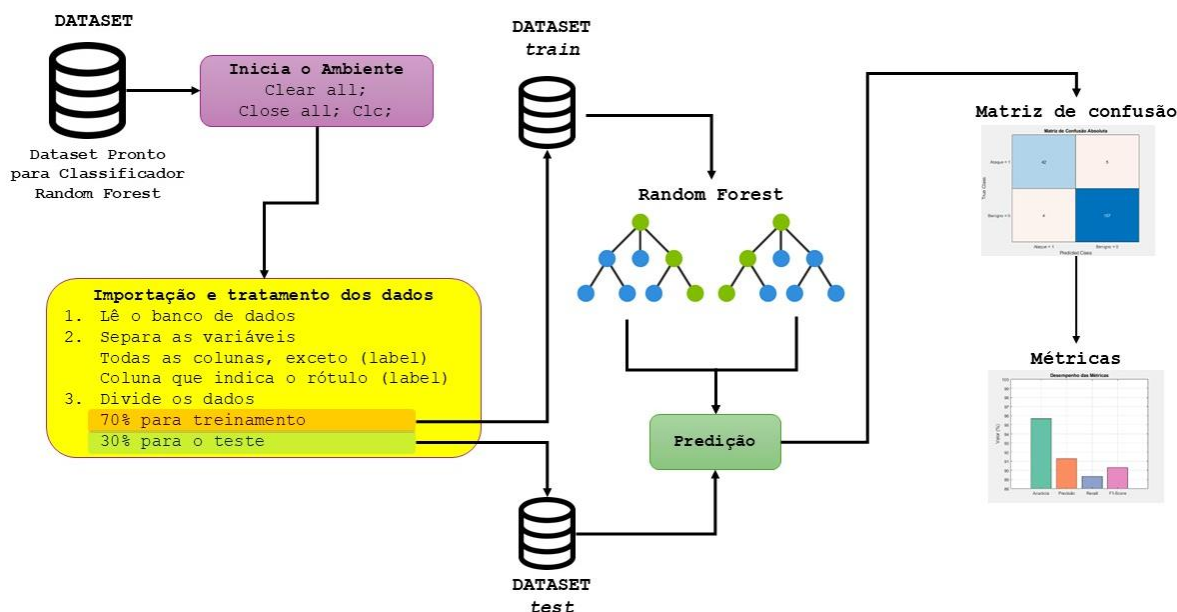
Após todos esses procedimentos de limpeza, balanceamento, extração de dados e normalização, obteve-se um *Dataset pré-processado*, ou seja, o banco de dados está apto para ser utilizado pelo classificador *Random Forest*.

3.5 Aplicação do Algoritmo de *Machine Learning* utilizando *MatLab*

Com o modelo construído, o classificador *Random Forest* foi praticado na plataforma *MatLab*, devido à sua capacidade de lidar com dados variados e resistência a sobreajuste (*overfitting*). Sendo assim, no fluxograma (**Figura 10**), o script inicializa garantindo o fechamento de guias anteriores e exclusão de dados,

garantindo nenhuma interferência com ambiente limpo e pronto para execução, para realizar a importação do *Dataset* já pré-processado.

Figura 10 – Fluxograma de execução do classificador *Random Forest* no MatLab



Fonte: Do Autor (2025)

Após a leitura do banco de dados, é realizada a separação das variáveis, dividindo a coluna que rotula as classes (*label*) em uma tabela Y, enquanto as demais colunas ficam armazenadas em X. Em seguida, são separados os dados de treinamento e teste. No caso deste modelo, as amostras foram divididas da seguinte forma:

- 70% para treinamento.
- 30% para teste.

Os dados separados para treinamento são alimentados pelo classificador, que executa a função de *Machine Learning*. Nesta ação, são estudados os padrões do tráfego de rede. Esse modelo de aprendizado é realizado por um conjunto de 100 árvores de decisão, construídas a partir de amostras diferentes. As árvores

determinam de forma independente e a classificação final é definida pela maioria das árvores.

Finalizando o treinamento, são utilizados os dados destinados aos testes, que são as amostras que não foram vistas. Nessa ação, é realizada a predição na finalidade de comparar os rótulos reais, separados no início do modelo. Então, esse comparativo evidencia de forma realista e eficaz a validação do desempenho do classificador. A partir dessa comparação, é gerada a matriz de confusão, da qual são extraídas as principais métricas de avaliação.

3.6 Avaliação do Modelo

A avaliação do desempenho de classificadores aplicados à detecção de intrusões em redes industriais é essencial para validar sua eficácia e confiabilidade. Entre os principais instrumentos utilizados nessa avaliação está a matriz de confusão, que fornece uma representação tabular dos resultados de classificação em quatro categorias: Verdadeiros Positivos (VP), Falsos Positivos (FP), Falsos Negativos (FN) e Verdadeiros Negativos (VN).

Quadro 2 - Matriz de Confusão

Matriz de Confusão	
Verdadeiros Positivos (VP)	Casos corretamente classificados como anomalias
Falsos Positivos (FP)	Casos erroneamente identificados como anomalias, quando na verdade são normais
Falsos Negativos (FN)	Casos incorretamente classificados como normais, quando na realidade são anomalias
Verdadeiros Negativos (VN)	Casos corretamente identificados como normais

Fonte: Do autor (2025)

Para avaliar o modelo, seguiram-se as métricas: Acurácia, Recall, *Precision* e *F1-Score*, onde ambos são calculados a partir da matriz de confusão, conforme fórmulas abaixo:

$$Acurácia = (VP + VN) / (VP + VN + FP + FN)$$

A acurácia é uma métrica simples que representa a proporção de previsões corretas em relação ao total de casos avaliados, sendo útil especialmente em conjuntos de dados balanceados. No entanto, em contextos com desequilíbrio entre classes, pode gerar interpretações equivocadas.

$$Precisão = VP / (VP + FP)$$

A precisão, por sua vez, mede a proporção de acertos entre os casos classificados como positivos, é importante para avaliar o quanto o modelo consegue identificar corretamente as anomalias sem gerar muitos falsos positivos. Um modelo com alta precisão tende a ser mais confiável para acionar alertas.

$$Recall = VP / (VP + FN)$$

O *Recall*, também conhecido como sensibilidade, mede a capacidade do classificador em identificar corretamente todos os casos positivos reais. Um alto valor de recall indica que o modelo está sendo eficaz em detectar a maioria das ameaças. No entanto, se o recall for muito baixo, o sistema pode falhar ao deixar de detectar ataques reais, comprometendo a segurança da rede.

$$F1 - Score = 2VP / (2VP + FP + FN).$$

O *F1-Score* é a média harmônica entre precisão e recall, sendo uma métrica de equilíbrio útil quando há necessidade de ponderar os dois aspectos. Essa métrica é particularmente recomendada em situações de desequilíbrio entre classes, pois evita que o desempenho do modelo seja superestimado com base em apenas uma das medidas.

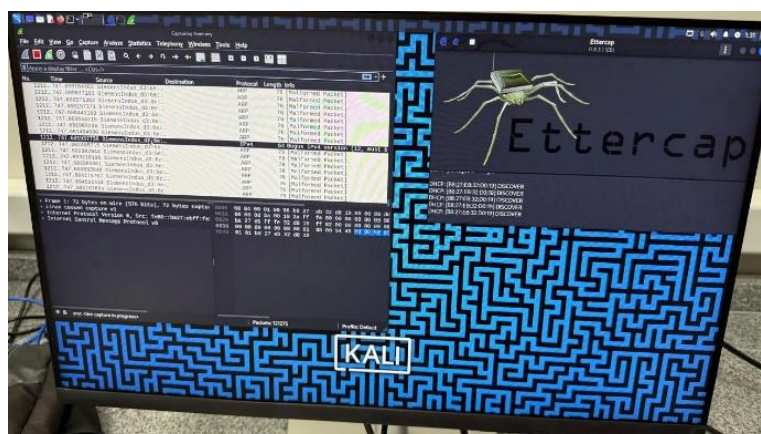
Nesse sentido, o uso das métricas possibilita entender sobre a capacidade do modelo de classificar corretamente os dados de rede, sendo imprescindível para o desenvolvimento de soluções robustas de detecção de intrusões em ambientes industriais complexos. Apresentando de forma mais clara, as principais métricas são importantes na avaliação do modelo no contexto de segurança cibernética.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Dificuldades encontradas

Em busca de atingir os objetivos mencionados, foi construída a simulação do ambiente industrial em bancada acadêmica, utilizando os itens descritos no tópico anterior. A princípio, o simulador de ataques (*Etttercap*) e o *Sniffer* de rede (*Wireshark*), seriam executados simultaneamente pelo hardware *Raspberry PI3*.

Figura 11 – *Etttercap* e *Wireshark* em execução



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Durante os testes no ambiente experimental, devido a limitações de desempenho do hardware, ocorreram diversas dificuldades, como travamentos e reinicializações. O caso foi solucionado com a adição de um notebook, para execução do software *Wireshark*, mantendo apenas o *sniffer* de rede na *Raspberry*.

4.2 Simulação e coleta de dados

Após os ajustes, todos os ambientes foram testados, ficando aptos para as simulações e coletas.

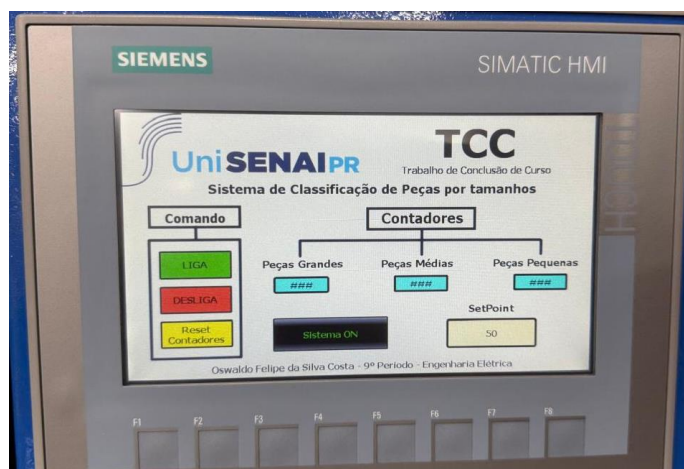
Figura 12 – Ambiente controlado para teste



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Foi realizada aproximadamente 30 minutos de simulação do processo de seleção das peças, em modo normal, onde foram coletados tráfegos cíclicos e acíclicos da rede entre os dispositivos industriais. Em seguida, foi inicializado o segundo teste com duração similar à anterior, porém, neste caso, executando o *Ettercap*, atacando a rede, onde nos primeiros instantes notou-se lentidão na execução das tarefas e falhas na apresentação das contagens na IHM.

Figura 13 – IHM com erros na indicação dos contadores



Fonte: Arquivo pessoal (2025)

Ao decorrer da simulação, outros comportamentos anômalos foram identificados, como a paralisação dos botões de comandos (Liga, Desliga e Reset), além da impossibilidade funcional do campo de “setpoint”, implementado para o operador definir o valor de contagem das peças.

4.3 Pré-processamento do Dataset

Coletados os dados, eles passaram pela concatenação, onde foram agrupados os arquivos e criados rótulos com a intenção de distinguir as classes das amostras.

Figura 14 – Amostras coletadas (a) sem ataque (b) com ataque

(a)		(b)	
No.	"Time", "Source", "Destination", "Protocol", "Length", "Info"	No.	"Time", "Source", "Destination", "Protocol", "Length", "Info"
1	"0.000000000", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	1	"0.000000", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::1:2", "DHCPv6", "157", "Solicit ID: 0x9f811d CID: 0001000128a0cc5c0897966724d8"
2	"0.199078229", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	2	"0.030898", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::1:2", "ICMPv6", "70", "Router Solicitation from 08:97:98:67:24:d8"
3	"0.398786145", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	3	"0.375232", "0.0.0.0", "255.255.255.255", "DHCP", "344", "DHCP Discover - Transaction ID 0xb61b62fb"
4	"0.599125156", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	4	"0.092805", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
5	"0.798893645", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	5	"0.093571", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"
6	"0.997266718", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	6	"0.3218168", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
7	"1.196992916", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	7	"0.3280356", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"
8	"1.395690937", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	8	"0.468482", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
9	"1.594890832", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	9	"0.624534", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"
10	"1.795013801", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	10	"0.967813", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
11	"1.994299947", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	11	"0.326741", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"
12	"2.193838228", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	12	"0.967763", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
13	"2.393956666", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	13	"0.679037", "169.254.148.89", "224.0.0.251", "MDNS", "75", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QU"" question"
14	"2.564444738", "Dell_e5:0d:56", "Broadcast", "ARP", "60", "Who has 192.168.0.2? Tell 192.168.0.241"	14	"0.680196", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::fb", "MDNS", "95", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QU"" question"
15	"2.569458228", "Dell_e5:0d:56", "Broadcast", "ARP", "60", "Who has 192.168.0.2? Tell 192.168.0.241"	15	"0.681188", "169.254.148.89", "224.0.0.251", "MDNS", "76", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QU"" question"
16	"2.593869686", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	16	"0.681853", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::fb", "MDNS", "96", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QU"" question"
17	"2.794568332", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	17	"0.717755", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"
18	"2.992492186", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	18	"0.686414", "169.254.148.89", "224.0.0.251", "MDNS", "76", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QM"" question"
19	"3.192575624", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	19	"0.687444", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::fb", "MDNS", "96", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QM"" question"
20	"3.391911665", "192.168.0.241", "192.168.0.255", "UDP", "82", "50616 > 1947 Len=40"	20	"0.688142", "169.254.148.89", "224.0.0.251", "MDNS", "75", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QM"" question"
		21	"0.688140", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::fb", "MDNS", "95", "Standard query 0x0000 PTR _ipp._tcp.local, ""QM"" question"
		22	"0.967228", "fe80::b7dc:b30:556f:be38", "f02::c", "UDP/XM", "718", "57975 > 3702 Len=656"
		23	"0.654679", "0.0.0.0", "255.255.255.255", "DHCP", "344", "DHCP Discover - Transaction ID 0xb61b62fb"
		24	"0.732235", "169.254.148.89", "239.255.255.250", "UDP/XM", "698", "57974 > 3702 Len=656"

Fonte: Do autor (2025)

Feito o tratamento inicial, realizou-se o pré-processamento dos dados que resultou em um *Dataset* organizado, limpo e normalizado, contendo apenas atributos relevantes das amostras, como demonstra a Figura 15.

Figura 15 – Dataset pronto

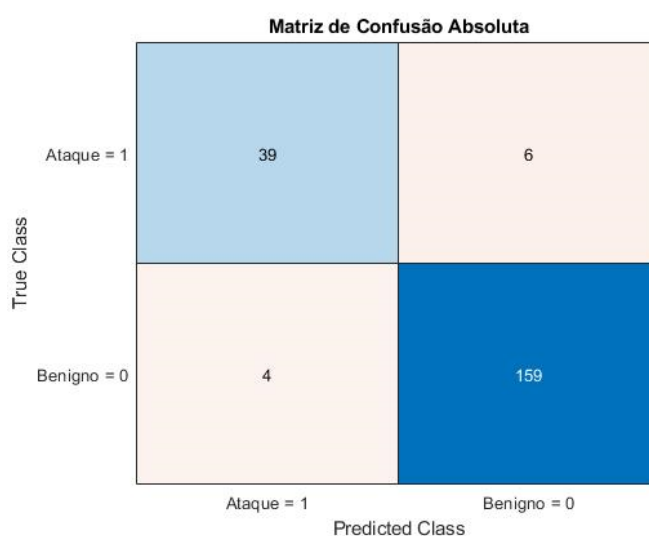
	packet_count_norm,mean_packet_size_norm,std_packet_size_norm,total_packet_size_norm,protocol_count_norm,label
1	0.0048638132295719845,0.0464767616191904,0.0,0.005238459019971625,0.0,0
2	0.0038910505836575876,0.0464767616191904,0.0,0.004244121891180715,0.0,0
3	0.005836575875486381,0.03705290212036837,0.029139044732306704,0.005699249396728389,0.1666666666666666,0
4	0.0029182879377431907,0.0464767616191904,0.0,0.0032497847623898044,0.0,0
5	0.0,0.22188905547226384,0.0016855226939260556,0.0,0
6	0.0,0.013493253373313335,0.0,0,0
7	0.0,0.013493253373313335,0.0,0,0
8	0.0,0.013493253373313335,0.0,0,0
9	0.0009727626459143969,0.013493253373313335,0.0,0.0007275637527738368,0.0,0
10	0.0,0.4407796101949026,0.003455927825675725,0.0,0
11	0.0009727626459143969,0.013493253373313335,0.0,0.0007275637527738368,0.0,0
12	0.0009727626459143969,0.013493253373313335,0.0,0.0007275637527738368,0.0,0
13	0.0019455252918287938,0.0464767616191904,0.0,0.002255447633598894,0.0,0
14	0.0038910505836575876,0.0464767616191904,0.0,0.004244121891180715,0.0,0
15	0.0038910505836575876,0.0464767616191904,0.0,0.004244121891180715,0.0,0
16	0.0038910505836575876,0.0464767616191904,0.0,0.004244121891180715,0.0,0
17	0.0019455252918287938,0.0464767616191904,0.0,0.002255447633598894,0.0,0
18	0.0009727626459143969,0.013493253373313335,0.0,0.0007275637527738368,0.0,0
19	0.0,0.43628185907046474,0.003419549638037033,0.0,0
20	0.0019455252918287938,0.15442278860569714,0.44194248718160983,0.004874677143584707,0.1666666666666666,0
21	0.0009727626459143969,0.013493253373313335,0.0,0.0007275637527738368,0.0,0

Fonte: Do Autor (2025)

4.4 Aplicação do Classificador

Com *Dataset* concluído e apto para ser aplicado ao modelo de classificador escolhido, foi inicializado, conforme *script* criado pelo *software Matlab*, o processo de *Machine learning* (treinamento). Como previsto, foi utilizado 70% do total de amostra do banco, gerando as predições, que posteriormente foram comparadas com os dados separados para testes e validações (30% das amostras do banco), finalizando o processo de classificação e obtendo o resultado apresentado pela figura abaixo:

Figura 16 – Matriz de confusão

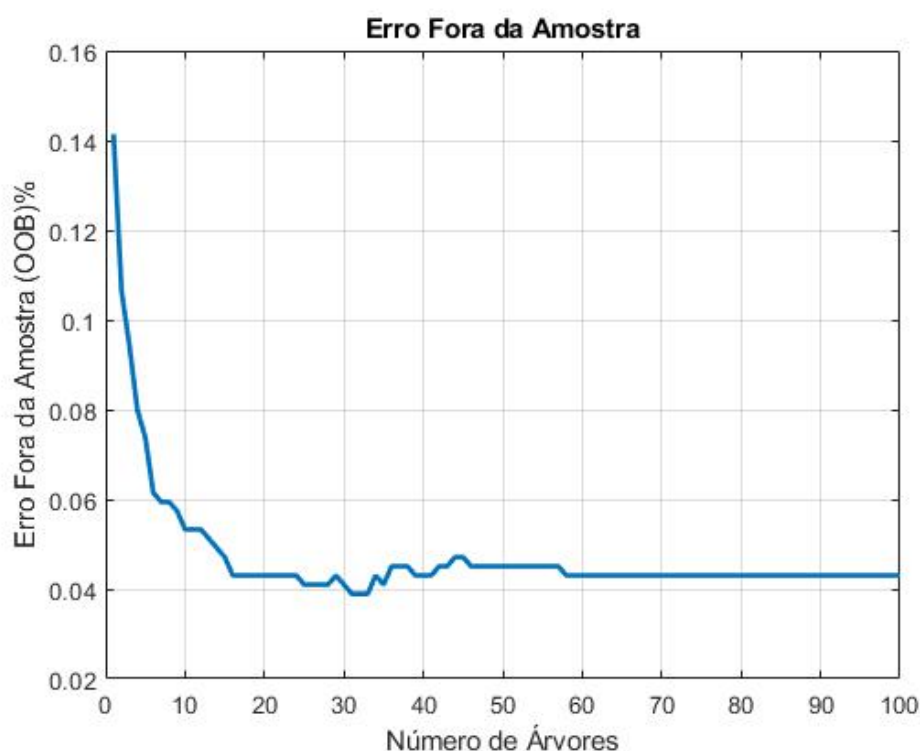


Fonte: Do Autor (2025)

Conforme resultado da matriz de confusão, observa-se que, considerando as amostras que realmente eram ataques, o modelo acertou em classificar 39 dessas amostras como anômalas (Verdadeiros Positivos) e errou classificando 6 delas como benignas (Falsos Negativos). É observado também que, considerando amostras que realmente eram benignas, as predições acertaram em 159 (cento e cinquenta e nove) casos (Verdadeiros Negativos), e errou em classificar 4 (quatro) amostras como ataques (Falsos Positivos). Contendo esses resultados, é possível gerar as métricas para melhor análise.

Para complementar a análise dos resultados do modelo de classificação, é necessário avaliar também a taxa de erro calculada sobre os dados não utilizados no treinamento de cada árvore (OOB).

Figura 17 – Resultado do OOB em porcentagem (%)

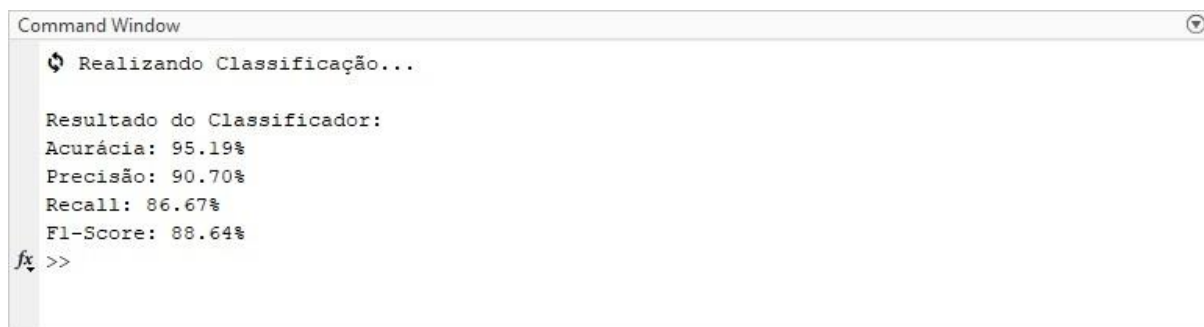


Fonte: Do Autor (2025)

Os dados apresentados evidenciam uma queda na taxa de erro no modelo aplicado, conforme o aumento do número de árvores, onde em cerca de 60 (sessenta) árvores o OOB se estabiliza na casa de 4%, o que comprova uma boa capacidade de predição, com baixo risco de *overfitting*, que seria um treinamento com foco excessivo em padrões irrelevantes e ruídos, gerando baixo desempenho.

Visto que os resultados até então foram satisfatórios, consideraram-se os dados gerados pela matriz de confusão, para elaboração das principais métricas conforme métodos já apresentados.

Figura 18 – Resultados das métricas (MatLab)



```
Command Window

Realizando Classificação...

Resultado do Classificador:
Acurácia: 95.19%
Precisão: 90.70%
Recall: 86.67%
F1-Score: 88.64%
fx >>
```

Fonte: Do Autor (2025)

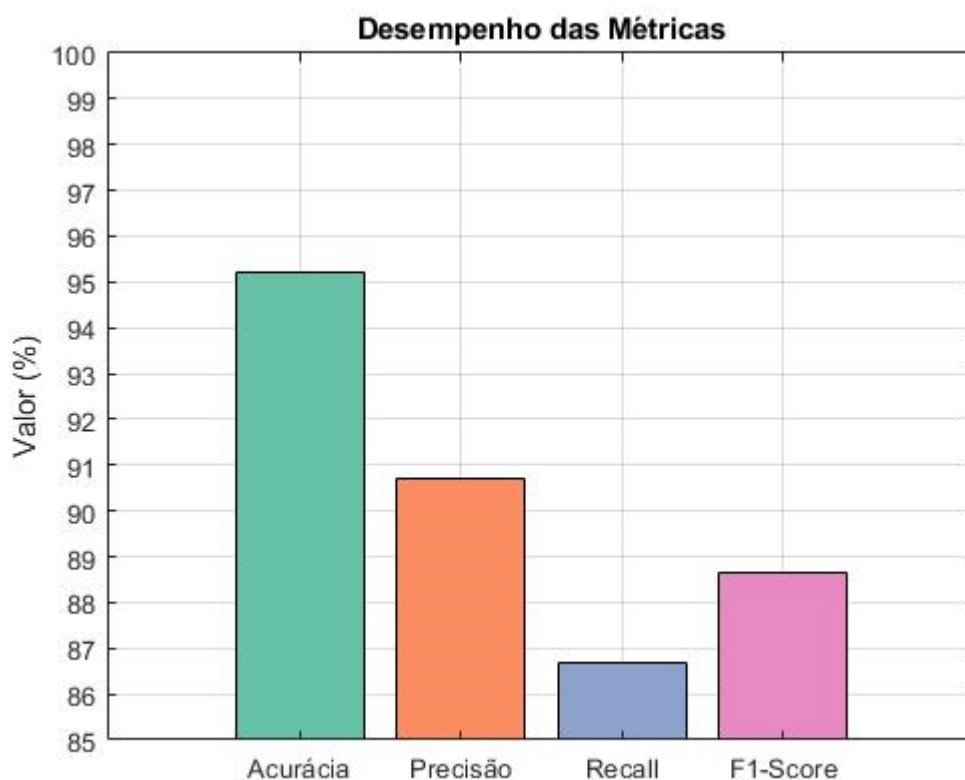
Analisando os resultados, identifica-se que a acurácia, que representa a proporção de classificações corretas, teve um alto desempenho geral, ultrapassando o índice de 95% de acerto nas predições.

No *Recall*, o resultado também foi positivo, chegando próximo de 87%, tendo uma boa detecção de anomalias. Visto que a métrica aponta a capacidade do modelo de identificar corretamente os exemplos positivos, onde no contexto atual de detecção de ataques cibernéticos é essencial a alta eficácia, pois deixar de identificar um ataque é mais perigoso do que um falso alarme.

Ao analisar a precisão, o resultado de 90,7% foi eficaz, pois o valor aponta que a maioria dos alertas dos modelos estava correta, ou seja, poucos falsos positivos. E, por fim, o resultado do *F1-Score*, que avalia a média harmônica entre precisão e

Recall, foi de 88,6%, que se comportou bem balanceado, obtendo resultado positivo, assim como as demais métricas.

Figura 19 – Comparativo das métricas



Fonte: Do Autor (2025)

Perante a análise geral das métricas, fica evidenciado que o modelo Random Forest apresentou desempenho robusto, equilibrado e com baixa tendência a *overfitting*, resultado esperado em contexto como o do sistema desenvolvido, que exige tanto confiabilidade quanto precisão nas predições, pois os resultados demonstraram a eficácia em detectar corretamente eventos relevantes e em evitar erros de classificação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que, mesmo com as dificuldades encontradas, a aplicação do algoritmo de aprendizado de máquina nos dados coletados, alinhada a um bom pré-processamento dos dados e a um ambiente experimental bem estruturado, utilizando ferramentas seguras e eficazes, representa uma solução viável, eficiente e altamente precisa para detecção de anomalias e ataques em redes industriais baseadas em protocolo *Profinet*. O trabalho desenvolvido contribui visivelmente para o fortalecimento da segurança cibernética no contexto da Indústria 4.0, trazendo uma metodologia econômica e aplicável, não só em ambientes acadêmicos, mas também em ambientes industriais.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do estudo para outros tipos de ataques, como, por exemplo: *Replay Attack*, *DoS*, *MAC*, que também são tipos de ataques em redes *Profinet*, ou outros protocolos industriais, como *Modbus*, *Profibus*, entre outros. Além da possibilidade de se aprofundar mais em técnicas ainda mais avançadas de aprendizado, como *Deep Learning*.

REFERÊNCIAS

ADARI, Suman Kalyan; ALLA, Sridhar. **Beginning anomaly detection using Python-based deep learning: implement anomaly detection applications with Keras and PyTorch**. 2. ed. [S.l.]: Apress, 2024.

AMO, Gustavo Garcia de; ROEPKE, Hermano. As IOT NETWORKS AND TECHNOLOGICAL INNOVATION IN INDUSTRY: Industrials network. **Revista e-TECH: Tecnologias para Competitividade Industrial-ISSN-1983-1838**, v. 17, n. 1, 2024.

CHOLLET, François. **Deep learning with Python**. 2. ed. Shelter Island, NY: Manning Publications, 2021.

CERT.br. Centro de Estudos, **Resposta e Tratamento de Incidentes de Segurança no Brasil. Relatório de Atividades 2023**. São Paulo: NIC.br, 2023. Disponível em: <https://www.cert.br>. Acesso em: 25 mai. 2025.

DEMETRIO, Danilo; JUNIOR, Orlando Rosa; PISCIOTTA, Alex. COMPARATIVO DE REDES DE COMUNICAÇÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS: Resumo. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 16, n. 1, 2024.

ILÁRIO, Lucas Rodrigues. **Contribuições para integração da indústria 4.0 nas redes elétricas inteligentes**. Dissertação (Mestrado). Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Sorocaba. 2020.103p.

MÊLO, Thiago. **FIESP diz que 30% das indústrias já foram alvo de ataques cibernéticos**. Metrôpoles, 17 fev. 2025. Disponível em: <https://www.metropoles.com/negocios/industria/fiesp-diz-que-30-das-industrias-ja-foram-alvo-de-ataques-ciberneticos>. Acesso em: 3 mar. 2025.

MOTA, Rubens Nascimento et al. Rastreabilidade no processo industrial baseado em conceitos da Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, v. 5, n. 1, p. 39-62, 2022

NICOLAIO, Ivo GA; MUNARETTO, Anelise; FONSECA, Mauro. Uma proposta de detecção de ataques cibernéticos em sistemas de controle industrial (ics). In: **Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS)**. SBC, 2023. p. 153-166

NICOLAIO, Ivo Gabriel de Abreu et al. **Deteção de ataques em duas fases usando aprendizado de máquinas em sistemas de controle industrial de infraestruturas crítica**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PONTES, Francisco Jeferson da Silveira. Avaliação do desempenho de técnicas de aprendizado de máquina na detecção de malware em tráfego de Redes IoT. 2024. 59 f. TCC (Graduação em Engenharia de Computação) – Campus de Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2024.

RASCHKA, S.; MIRJALILI, V. **Python machine learning: machine learning and deep learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow**. 2. ed. Birmingham: Packt Publishing, 2017.

TEIXEIRA, Catharina Daher; CLARIM, Mariana de Lacerda. **Estudo das vulnerabilidades de tecnologias sem fio utilizadas em ambientes IoT**. Brasília,

2017. Trabalho de Graduação (Engenharia de Redes de Comunicação) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

TURCATO, Afonso Celso. **Desenvolvimento de método para detecção de intrusão em redes PROFINET baseado em técnicas de Aprendizado de Máquina.** 2020. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTE ELÉTRICA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

Luis Felipe da Silva Maciel e Renato Kazuo Miyamoto*

RESUMO

Este trabalho investiga o diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos por meio da análise de vibração via assinatura de corrente elétrica. Considerando que os rolamentos são responsáveis por aproximadamente 40% das falhas nesses motores, a pesquisa utiliza análise de sinais de correntes coletados sob diferentes condições de cargas, que foram tratados pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) no Matlab para identificar as frequências características dos defeitos. Os resultados mostram que a análise espectral da corrente permite identificar precocemente defeitos, oferecendo uma alternativa eficiente e de menor custo para manutenção preditiva industrial, contribuindo para a redução de paradas inesperadas e aumento da vida útil dos motores.

Palavras-chave: Motores de indução trifásico; Falhas em rolamentos; Análise de vibração; Assinatura de corrente; Manutenção preditiva.

Current Signal Analysis for Diagnosing Bearing Faults in Three-Phase Induction Motors

ABSTRACT

This work investigates the diagnosis of faults in three-phase induction motor bearings using vibration analysis via electric current signature. Considering that bearings are responsible for approximately 40% of faults in these motors, the research uses analysis of current signals collected under different load conditions, which were treated by the Fast Fourier Transform (FFT) in Matlab to identify the characteristic frequencies of the faults. The results show that current spectral analysis enables early identification of faults, offering an efficient and lower-cost alternative for industrial predictive maintenance, helping to reduce unexpected downtime and increase the useful life of motors.

Key words: Three-phase induction motors; Bearing faults; Vibration analysis; Current signature; Predictive maintenance.

* Autor correspondente (e-mail): renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo Komez e Dems (2022), estima-se que de 30% a 70% da eletricidade em plantas industriais, é consumida por motores de indução trifásico. Neste cenário, aproximadamente 300 milhões de motores estão instalados no setor industrial, e a quantidade aumenta em uma taxa de cerca de 15% ao ano.

Nesse sentido, os motores de indução trifásicos (MIT) demonstram alta eficiência e são amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez, facilidade de manutenção e baixo custo. No entanto, esse tipo de equipamento como qualquer outro, está sempre sujeito a falhas, que podem comprometer seu desempenho e segurança durante operações. Isso pode levar a interrupções de processos industriais, resultando em perdas financeiras, podendo ser maior que o valor da própria máquina (Tahkola et al., 2022).

Estudos indicam que as falhas nos motores de indução se distribuem da seguinte forma: 40% aos rolamentos, 28% estão relacionadas a falhas no estator, 24% se referem a diversos fatores como falhas de ventilação, instalação inadequada, problemas na alimentação elétrica e 8% está relacionada a falhas no rotor (Radecki et al., 2016).

Entre todas as falhas mecânicas, os danos em rolamentos se destacam como um dos mais críticos. Esse tipo de falha é associado à corrosão, desgaste, contaminação e lubrificação inadequada dos rolamentos que afetam diretamente a vida útil do motor. Essas falhas podem refletir no aumento das perdas rotacionais e promover uma instabilidade no rotor, desalinhando-o em relação ao estator. Como consequência, ocorrem alterações nas indutâncias próprias e as mútuas das fases, gerando distorções no espectro de frequências da corrente elétrica do estator (Ojaghi et al., 2018).

Durante a operação normal do motor, os rolamentos podem desenvolver fissuras em suas superfícies, geralmente ocasionadas por impactos recorrentes ao longo do funcionamento. Essas fissuras são uma das principais causas de desbalanceamento do motor e, em muitos casos, resultam do uso inadequado do

equipamento. Também é possível que tais falhas se originem ainda na etapa de fabricação do motor (Nishat e Kim, 2020). Nesse contexto, a manutenção preditiva consiste em um conjunto de ações voltadas ao monitoramento de variáveis e parâmetros que refletem o desempenho do equipamento, permitindo a identificação antecipada de falhas potenciais (Otani e Machado, 2008).

A avaliação da integridade dos rolamentos é comumente realizada por meio de métodos que utilizam a coleta e análise de sinais de vibração (Deng et al., 2018; Nayana e Geethanjali, 2017; Wang et al., 2017). No entanto, uma das principais desvantagens desse método está no alto custo dos sensores e equipamentos, o que limita seu uso a máquinas de grande porte. Além disso, em certas aplicações industriais, o acesso direto ao motor de indução pode ser dificultado após a montagem da planta, o que torna desafiador o posicionamento ideal dos sensores para detecção de falhas nos rolamentos (Dalvand et al., 2017; Nishat e Kim, 2020).

Além da análise de vibração, há diversas abordagens complementares utilizadas no monitoramento de falhas em rolamentos, como sensores de emissão acústica, análises térmicas e termografia infravermelha (Azeez, Alkhedher e Gadala, 2020; Glowacz, 2018). Destacam-se também técnicas baseadas em inteligência artificial, voltadas à classificação de partículas de desgaste presentes nos detritos do lubrificante (Ranjan, Ghosh e Kumar, 2020).

Dada a importância dos motores de indução trifásicos nas aplicações industriais, a manutenção preditiva desempenha um papel relevante ao contribuir para a ampliação da vida útil da máquina e a continuidade do processo produtivo minimizando paradas não programadas que poderiam acarretar prejuízos financeiros. Nesse cenário, o diagnóstico de falhas nos rolamentos desses motores viabiliza o agendamento prévio de intervenções corretivas, evitando interrupções inesperadas. Essa abordagem também se destaca por sua facilidade de implementação e pelo potencial diagnóstico em tempo real (Dalvand et al., 2018; Martinez-Herrera et al., 2022; Okwuosa, Akpudo e Hur, 2022; Soualhi et al., 2019).

Diante desse contexto, a principal motivação deste trabalho consiste na identificação de falhas em rolamentos de motores de indução trifásico, através da

análise de vibração baseada na assinatura de corrente, simulando diversas condições de cargas e submetendo diversas condições de rolamentos. Com esse propósito, será utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) implementada no *software* Matlab, a partir de coletas experimentais utilizando um MyDAQ e circuitos de condicionamento de sinais.

Uma breve introdução sobre as contribuições e as características do tema proposto nesse trabalho são apresentadas nesta seção. A sequência deste trabalho está organizada em 4 seções, a saber: a Seção 2 contempla a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos e estudos relacionados ao tema; a Seção 3 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa; a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos; por fim, a Seção 5 reúne as conclusões do estudo, destacando as contribuições e possíveis direções para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

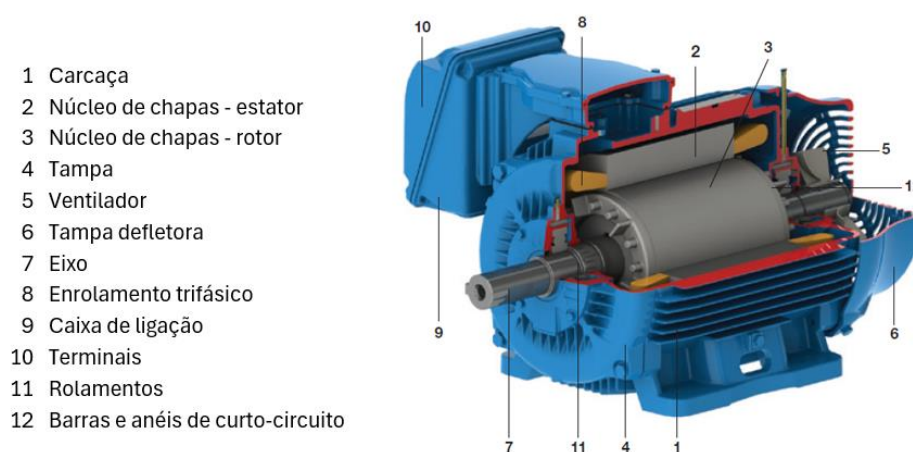
A fundamentação teórica tem como objetivo contextualizar os principais conceitos relacionados ao diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, com ênfase nos rolamentos, sensores e técnicas de análise utilizadas para esse fim. Inicialmente, apresenta-se a relevância dos motores de indução no cenário industrial, destacando suas características construtivas e operacionais. Em seguida, discute-se a ocorrência de falhas em rolamentos e seus impactos no desempenho dos motores. Na sequência, são abordados os tipos de sensores comumente empregados na detecção dessas falhas, com ênfase na medição de corrente e vibração. Por fim, exploram-se as principais técnicas de processamento de sinais aplicadas ao diagnóstico, com enfoque na extração e interpretação de informações relevantes para a identificação precoce de danos.

2.1 Motores de Indução e sua importância para a indústria

De acordo com Fitzgerald et al. (2003), motores de indução trifásicos operam com base na criação de um campo magnético girante gerado pelas correntes

trifásicas no estator. Esse campo, ao interagir com o rotor, induz correntes elétricas nos condutores do rotor, gerando o torque necessário para a rotação. A forma construtiva do motor garante alto desempenho, baixa necessidade de manutenção e eficiência elevada, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Corte ilustrativo de um motor de indução tipo gaiola de esquilo.



Fonte: Adaptado WEG (2024).

O princípio básico de funcionamento desses motores é a indução eletromagnética. Quando um sistema trifásico de tensões é aplicado ao estator, gera-se um campo magnético girante, cuja velocidade é constante e denominada velocidade síncrona (n_s), definida pela equação (1):

$$n_s = \frac{120f_{se}}{P} \quad (1)$$

onde:

n_s é a velocidade síncrona em rpm;

f_{se} é a frequência da rede elétrica em Hertz (Hz);

P é o número de polos do motor.

Segundo Chapman (2013), o campo magnético gerado no estator corta as barras do rotor, induzindo correntes elétricas. Essas correntes induzidas produzem um torque eletromagnético que movimenta o rotor na direção do campo girante. Para

que esse fenômeno ocorra adequadamente, é necessário que o rotor sempre gire a uma velocidade inferior à síncrona. Essa diferença entre as velocidades é denominada escorregamento (s), definido pela equação (2):

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

onde:

s é o escorregamento;

n_m é a velocidade mecânica do rotor em rpm.

Quando um motor opera com desequilíbrio entre as tensões, a velocidade que atua sobre a carga é reduzida rapidamente ao longo da operação do motor de indução trifásico, isso ocorre devido ao escorregamento elevado, no qual, está associado às perdas adicionais do rotor (IEC 60034-26). De acordo com Brito (2002), os motores de indução trifásicos são amplamente empregados na indústria em aplicações diversas, como acionamento de bombas, compressores, ventiladores e equipamentos de movimentação de cargas, entre outros usos industriais.

Nesse contexto, os motores de indução trifásicos permanecem como a principal solução em acionamento eletromecânico industriais modernos. Sua ampla aceitação deve-se à capacidade de operar com alta eficiência em diferentes condições de carga, resistência a ambientes adversos e compatibilidade com sistemas automatizados de controle (Chapman, 2013).

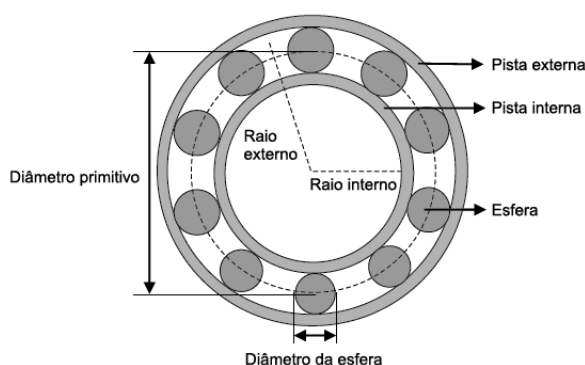
Sabendo que a estrutura construtiva do MIT garante seu desempenho, os rolamentos desempenham um papel crucial no funcionamento do sistema. Eles são essenciais para a sustentação do eixo, que, devido à carga constante que suporta, está sempre sujeito a falhas. Tais falhas são responsáveis por uma parcela significativa dos problemas no MIT (Radecki et al., 2016).

2.2 Falhas de rolamentos em motores de indução

Os rolamentos são componentes mecânicos fundamentais no funcionamento de motores de indução, responsáveis por sustentar o eixo do rotor e permitir seu

movimento com o menor atrito possível. No entanto, por estarem diretamente sujeitos a cargas extremas, vibrações e condições ambientais adversas, os rolamentos são os elementos mais propensos a falhas nesses motores (Radecki et al., 2016). A Figura 2 ilustra a estrutura de um rolamento.

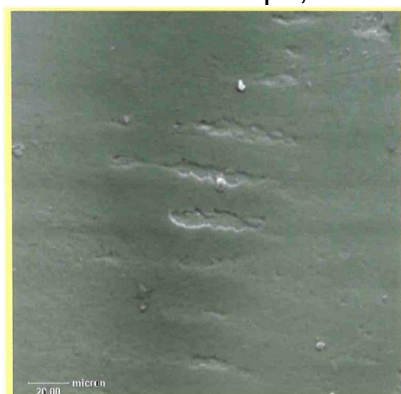
Figura 2 – Estrutura de um rolamento e seus principais elementos.



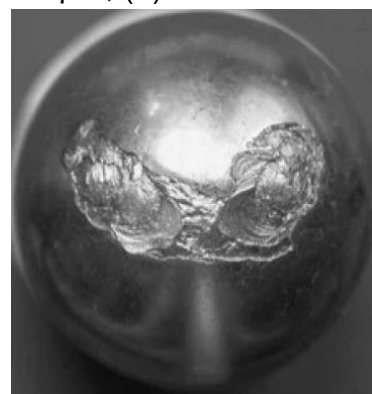
Fonte: Costa et al. (2016).

Segundo Garcia (2024), a falha em rolamentos é uma das principais causas de interrupções em motores de indução trifásico e deve ser objeto de monitoramento constante. A Figura 3 ilustra as degradações observadas nos principais componentes dos rolamentos.

Figura 3 – Desgaste em rolamentos: (a) desgaste nas pistas, causados por um movimento de um terceiro corpo, analisada a $20\ \mu\text{m}$; (b) esfera danificada.



(a)



(b)

Fonte: (a) Medeiros (2002); (b) Toliyat et al. (2012).

Estima-se que 40% das falhas em motores elétricos estejam relacionadas aos rolamentos (Radecki et al., 2016). Essas falhas podem ser agrupadas em diferentes categorias, como desgaste nas pistas, corrosões, desalinhamento e desbalanceamento.

Além disso, falhas em rolamentos causam aumento de vibração, perda de eficiência energética, ruídos e paradas frequentes do motor. A pesquisa de Marques e Brito (2019) utilizou testes com massas desbalanceadas para demonstrar que a integridade dos rolamentos afeta diretamente a vibração e a temperatura do motor.

2.3 Sensores aplicados na detecção de falhas em motores de indução

A detecção precoce de falhas em motores de indução trifásicos é essencial para evitar paradas inesperadas, perdas operacionais e danos irreversíveis aos equipamentos.

2.3.1 Sensores de vibração

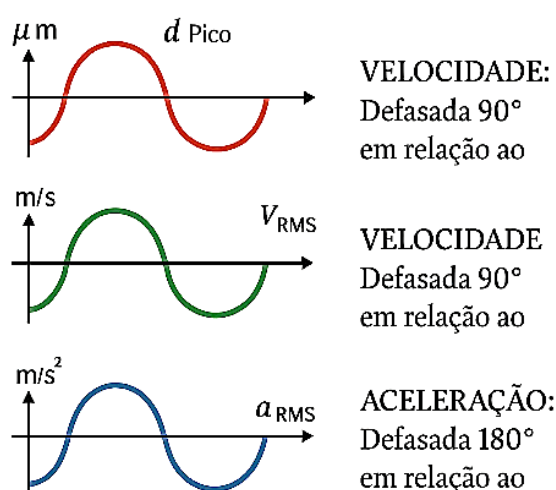
Os sensores de vibração, especialmente os acelerômetros, são geralmente utilizados na manutenção preditiva. Esses dispositivos convertem movimentos mecânicos em sinais elétricos, permitindo o monitoramento de desbalanceamentos, folgas, desalinhamentos e, principalmente, falhas em rolamentos (NBR 16881:2020; Ramalho et al., 2014; Marques e Brito, 2019). Esse sensor nos permite fazer medição através de parâmetros como: velocidade, deslocamento e aceleração. Na Figura 4, observa-se essas formas de ondas senoidais.

Conforme a NBR 16881:2020 para a medição e avaliação da vibração em máquinas rotativas, é recomendando faixas de frequência e pontos de instalação. A vibração é uma das primeiras manifestações físicas de falha, tornando-se uma ferramenta valiosa para diagnósticos em tempo real.

Segundo Ramalho et al. (2016) a aplicação de sensores MEMS (*Microelectromechanical Systems*) possibilitou a detecção eficaz de padrões vibracionais distintos em motores com falhas simuladas. Por outro lado, Marques e

Brito (2019) mostraram experimentalmente que a inserção de massas desbalanceadoras nos rolamentos elevou significativamente os níveis de vibração e temperatura.

Figura 4 – Formas de ondas senoidais de defasagem dos parâmetros de vibração.



Fonte: Da Silva Pereira (2021).

Além disso, muitos estudos utilizam análise espectral para associar frequências específicas a componentes danificados, como rolamentos ou engrenagens. Benito et al. (2023) utilizaram análise biespectral para aprimorar a sensibilidade do diagnóstico em sinais de corrente, enquanto Heckbert (1995) destaca a relevância da FFT (*Fast Fourier Transform*) no processamento digital de sinais em sistemas mecânicos e eletromecânicos. A FFT, que será detalhada na seção 2.4.2, é frequentemente utilizada para processar esses sinais e gerar espectros informativos.

2.3.2 Sensores de Corrente

Como as falhas em rolamentos produzem vibrações com frequências características bem definidas, a análise espectral tanto dos sinais de vibração quanto da corrente elétrica do motor destaca-se como uma das principais estratégias de diagnóstico a MCSA (*Motor Current Signature Analysis*), permitindo a identificação precoce e localizada dessas anomalias mecânicas (Bianchini, 2023).

Diversos tipos de sensores de corrente são empregados em sistemas de diagnóstico, como:

- Transformadores de corrente (TCs): comuns em aplicações industriais, permitem medição de correntes elevadas com segurança elétrica.
- Sensores de efeito Hall: São capazes de medir tanto corrente contínua quanto alternada, são úteis em aplicações de monitoramentos contínuos com respostas rápidas.
- Shunts resistivos: utilizados em medições de baixa corrente, com boa precisão em bancada de testes.

Conforme demonstrado por Souza (2018), a utilização de sensores de corrente em conjunto com placas de aquisição possibilitou a detecção de distúrbios internos no motor sem a necessidade de intervenções mecânicas.

Lopes et al. (2017), por sua vez, aplicaram algoritmos de classificação (Random Forest) aos sinais de corrente, obtendo alta taxa de acerto na identificação de falhas em rolamentos, mesmo sob diferentes condições de carga e tensão. Além disso, a técnica MCSA é altamente recomendada em ambientes industriais automatizados, permitindo sua integração com sistemas de controle, alertas e dashboards em tempo real.

2.4 Técnicas de processamento de sinais no diagnóstico de falhas

A eficiência dos métodos de diagnóstico depende diretamente da forma como os sinais são adquiridos e processados. Como destaca Heckbert (1995), a aquisição de sinais é o primeiro passo fundamental em qualquer sistema de diagnóstico baseado em análise espectral

2.4.1 Aquisição de Sinais

A coleta de dados exige equipamentos com alta taxa de amostragem e resolução suficiente para captar frequências características de falhas. Um exemplo é a utilização do sistema MyDAQ com o MATLAB, que permite aquisição simultânea de

sinais de corrente e vibração com interface gráfica para visualização em tempo real (Souza, 2018; Dalmolim, 2019).

Os sensores devem ser posicionados de forma estratégica em pontos específicos do motor (como próximo aos rolamentos), para garantir maior sensibilidade à detecção de anomalias. Além disso, a calibração dos sensores e o tratamento de ruído são fundamentais para a qualidade do diagnóstico.

2.4.2 Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*)

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é a ferramenta de análise mais utilizada para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa técnica permite identificar componentes rotineiros que indicam falhas mecânicas específicas, como ressaltos no anel interno do rolamento ou irregularidades nas esferas (Bianchini, 2023; Benito et al. 2023; Santos et al. 2019; Brito 2002).

Santos et al. (2019) mostraram que a aplicação da FFT em sinais acústicos permitiu distinguir motores com rolamentos saudáveis daqueles com falhas como corrosão ou impacto. Verardi (2008) complementa ao afirmar que a FFT também é útil na análise de ruídos e vibrações associadas ao sistema de ventilação dos motores.

Além disso, Heckbert (1995) e Mateer (2008) descrevem as bases matemáticas da FFT, evidenciando sua eficiência e aplicabilidade em sistemas digitais, conhecida como Transformada Discreta de Fourier (do inglês, *Discrete Fourier Transform – DFT*). A DFT é calculada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

em que $X(k)$ é a DFT, $x[n]$ o sinal discreto de entrada e N o número total de amostras. Devido as problemáticas de rolamentos de motores de indução trifásico, diversos estudos já utilizaram algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) como uma técnica eficaz para identificar esses defeitos (Santos et al. 2019; Brito 2002).

Considerando que o movimento do eixo do motor de indução é radial, as falhas nos rolamentos geram perturbações periódicas em frequências características, que podem estar associadas a defeitos nas pistas externas (BPFO), nas pistas internas (BPFI) ou nas esferas do rolamento (BSF) (Bianchini, 2023). As equações são dadas por:

Falhas nas pistas Externas (BPFO):

$$f_{ext} = \frac{N_e}{2} f_r \left(1 - \frac{D_e}{D_c} \cos \beta_{ct}\right) \quad (4)$$

Falhas nas pistas Internas (BPFI):

$$f_{int} = \frac{N_e}{2} f_r \left(1 + \frac{D_e}{D_c} \cos \beta_{ct}\right) \quad (5)$$

Falhas nas esferas (BSF):

$$f_{esf} = \frac{D_c}{D_e} f_r \left(1 - \frac{D_e^2}{D_c^2} \cos^2 \beta_{ct}\right) \quad (6)$$

onde:

f_{ext} é a frequência de falha na pista externa;

f_{int} é a frequência de falha na pista interna;

f_{esf} é a frequência de falha nas esferas;

f_r é a frequência de rotação;

N_e é o número de esferas internas;

D_e é o diâmetro das esferas;

D_c é a distância entre os centros de duas esferas;

β_{ct} é o ângulo de contato entre a esfera e a carcaça.

Com base nos conceitos e estudos apresentados na fundamentação teórica, observa-se que a análise de sinais elétricos, especialmente via assinatura de corrente, constitui uma alternativa viável e promissora para o diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos.

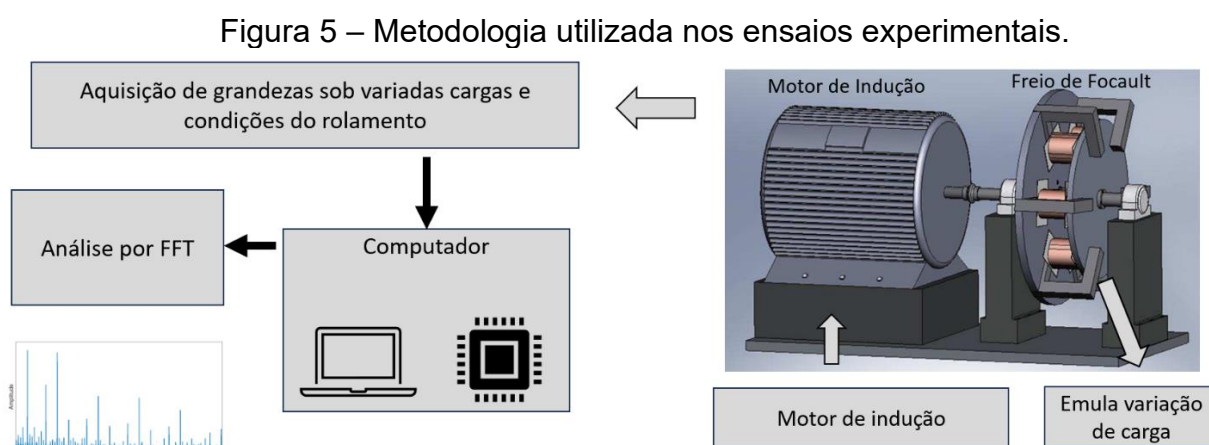
Considerando as limitações associadas aos sensores de vibração e o potencial da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na extração de frequências características, definiu-se uma abordagem experimental orientada à aplicação prática desses conceitos. A próxima seção descreve detalhadamente a metodologia adotada

para a coleta, processamento e análise dos sinais de corrente, bem como a configuração do sistema de ensaios utilizado nesta pesquisa.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se na análise de vibração por meio da corrente elétrica, simulando defeitos nas esferas do rolamento de um motor de indução trifásico, operando sob diferentes níveis de carga.

O sinal de corrente de alimentação do motor é coletado, tratado e, em seguida, processado para calcular o tempo de aquisição com base na taxa de amostragem. após essa etapa, a corrente é representada graficamente em função do tempo. Na sequência, realiza-se uma análise no domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), na qual se calcula a amplitude espectral e os resultados são apresentados por meio de gráficos, permitindo a identificação de padrões associados às falhas simuladas. A Figura 5 ilustra um fluxograma sobre a metodologia utilizada nos ensaios experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

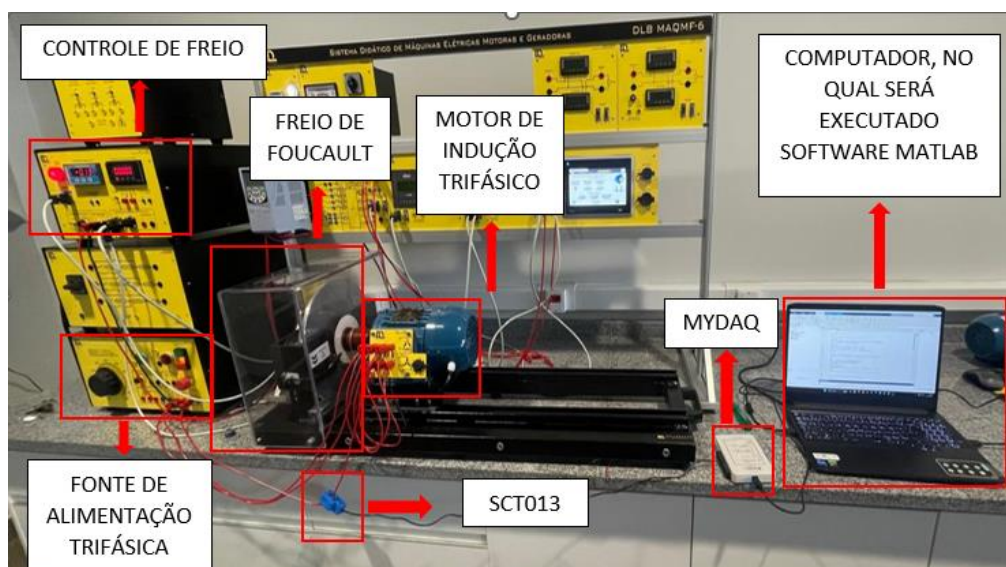
Foi utilizado a bancada de estudos de máquinas elétricas rotativas DLB MAQMF-6 da DeLorenzo, sendo composta por um freio de Foucault acoplado a um

motor de indução trifásico. A Figura 7 ilustra a bancada experimental utilizada para a implementação da metodologia deste trabalho, composta por um conjunto de equipamentos interligados para viabilizar a análise de vibração via assinatura de corrente em motores de indução trifásicos.

A alimentação do sistema é realizada por uma fonte trifásica, que energiza diretamente o motor, o qual está acoplado mecanicamente a um freio de Foucault. Esse freio, controlado por um painel com potenciômetro, permite simular diferentes condições de carga, ajustando o esforço resistivo sobre o eixo do motor. Para a coleta dos dados, foi utilizado o sensor de corrente do tipo clamp SCT013, conectado a uma das fases do motor, com o objetivo de capturar os sinais elétricos correspondentes ao seu funcionamento.

Esses sinais são transmitidos para o *hardware* de aquisição MYDAQ, que converte as medições analógicas em digitais e as encaminha para o computador. Neste sentido, o *software* MATLAB executa um *script* que realiza o tratamento dos dados e aplica a Transformada Rápida de Fourier (FFT), possibilitando a análise espectral das correntes em busca de padrões associados a falhas em rolamentos.

Figura 7 – Bancada Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A disposição dos componentes e a integração dos dispositivos garantem a fidelidade da coleta e o controle das variáveis experimentais. As principais características do sistema são listadas:

- O motor de indução trifásico de 1 cv está sendo energizado por partida direta;
- O controlador do freio de Foucault é ajustável por meio de um potenciômetro, permitindo a configuração do motor para operar em diferentes níveis de carga;
- O SCT013 é um sensor de corrente que será acoplado a uma das fases para a coleta de dados. A Figura 8 ilustra o sensor;

Figura 8 – Sensor de Corrente

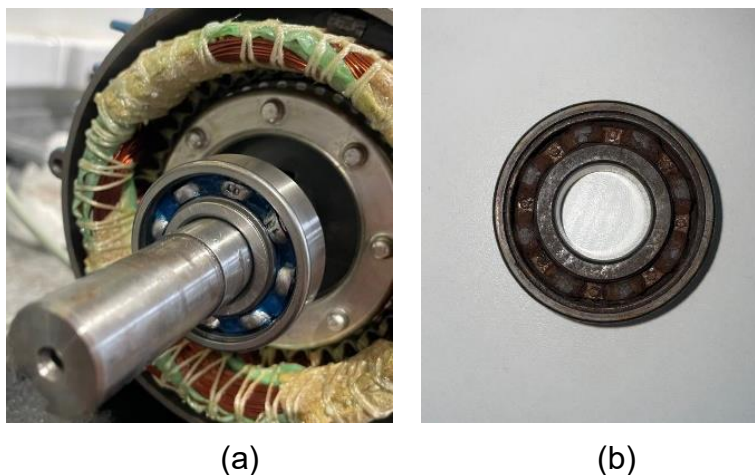


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- O MYDAQ funciona como um sistema de aquisição, que permite a medição da corrente elétrica e a conversão dos sinais analógicos em dados digitais para análise;
- O Software MATLAB é utilizado para a aquisição e processamento. O Script desenvolvido realiza o tratamento dos dados e exibe os resultados de formas estruturada, juntamente com apresentação de gráficos;

Para a simulação de falhas em rolamentos do MIT, foi utilizado um rolamento com duas esferas desgastadas e um rolamento totalmente desgastado, conforme observa-se na Figura 10.

Figura 10 – Desgaste em rolamentos: (a) esferas danificadas; (b) rolamento oxidado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Tabela 1 apresenta a estrutura dos ensaios realizados para avaliação das falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. Foram conduzidos experimentos com três condições distintas de integridade dos rolamentos: rolamento em bom estado, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Tabela 1 – Métodos de Ensaios

Ensaios	Condições de operação do MIT	Frequência de amostragem
Rolamento Bom	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz
Rolamento Oxidado	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz
Rolamento com esferas danificadas	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para cada uma dessas condições, o motor foi operado sob três níveis de carga distintos: a vazio (corrente de 1,6 A), em corrente nominal (2,8 A) e em corrente correspondente ao fator de serviço (3,6 A), totalizando nove ensaios distintos. Todos os testes foram realizados com uma frequência de amostragem de 15 kHz, valor adequado para capturar as componentes de alta frequência associadas às falhas nos rolamentos, garantindo resolução suficiente para aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na identificação das assinaturas espectrais características. A padronização da taxa de aquisição contribui para a comparabilidade dos dados obtidos entre os diferentes cenários testados.

A seguir, na Seção 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dessa metodologia experimental.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização dos experimentos e análises do motor de indução trifásico em diferentes condições operacionais. A análise busca evidenciar os efeitos de defeitos específicos nas esferas internas, além disso validar as metodologias utilizadas para os ensaios.

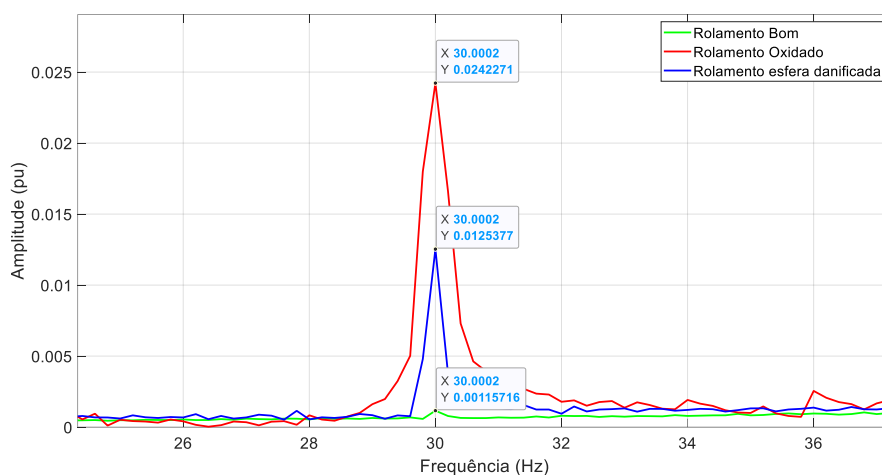
Nesse sentido, utilizou-se o cálculo da frequência de giro das esferas (*Ball Spin Frequency - BSF*), no qual foi considerado um ângulo de contato $\beta = 0^\circ$ entre as esferas e a pista externa. Aplicando a equação (6), obteve-se um valor de $BSF = 30,249 \text{ Hz}$, que serviu como referência para as análises.

A seguir serão apresentados nos gráficos a análise de amplitudes de todos os sinais coletados, sendo com falha ou sem falha, em todas as condições de cargas.

4.1 Análise com o motor a vazio.

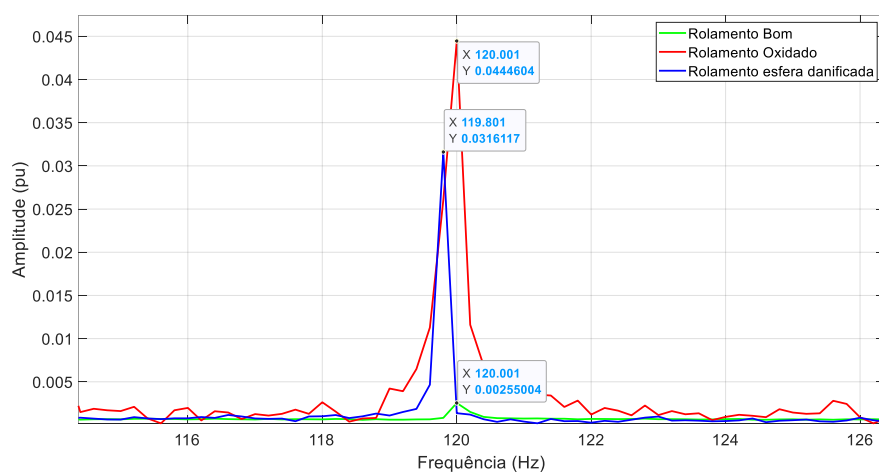
As figuras 11 e 12 ilustram respectivamente o espectro de frequência do sinal de BSF. Considerando o motor de indução operando a vazio, que apresenta as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 11 – Espectro em 30 Hz: Motor de indução a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 12 - Espectro 2º harmônica em 120 Hz: Motor de indução a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

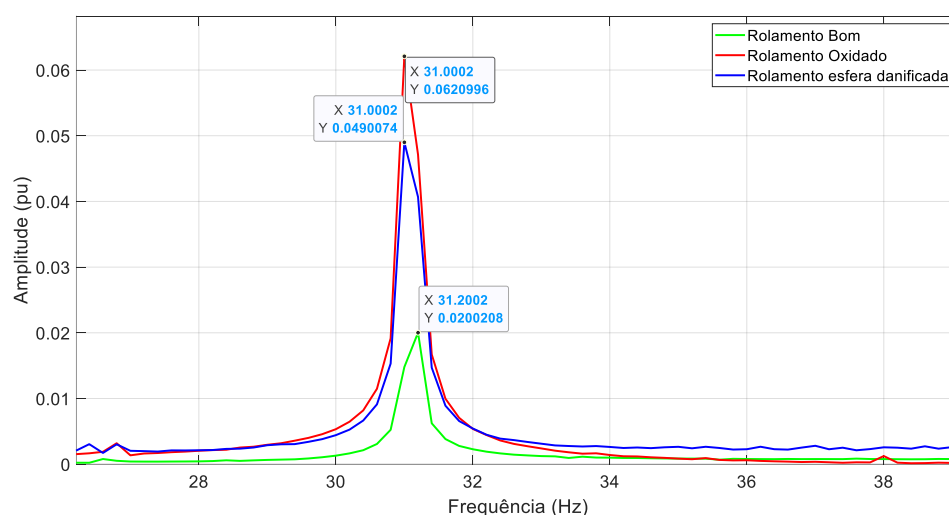
A análise dos espectros apresentados nas Figuras 11 e 12 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, mesmo com o motor operando a vazio. Na Figura 11, observa-se que o rolamento com esferas danificadas apresenta um pico de amplitude mais acentuado

em 30 Hz quando comparado ao rolamento oxidado. De forma complementar, a Figura 12, correspondente à segunda harmônica (120 Hz), reforça esse comportamento, evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.2 Análise com o motor operando e corrente nominal 2,8A.

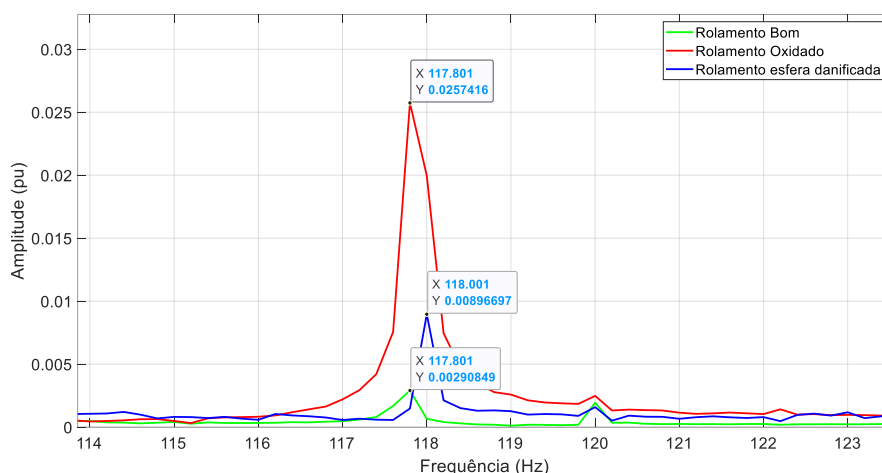
Considerando o motor de indução operando em sua corrente nominal de 2,8A, as figuras 13 e 14 mostram respectivamente o espectro de frequência do sinal de BSF, com as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 13 - Espectro próximo à 30 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente nominal 2,8A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 14 - Espectro 2° harmônica próximo à 120 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente nominal 2,8A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

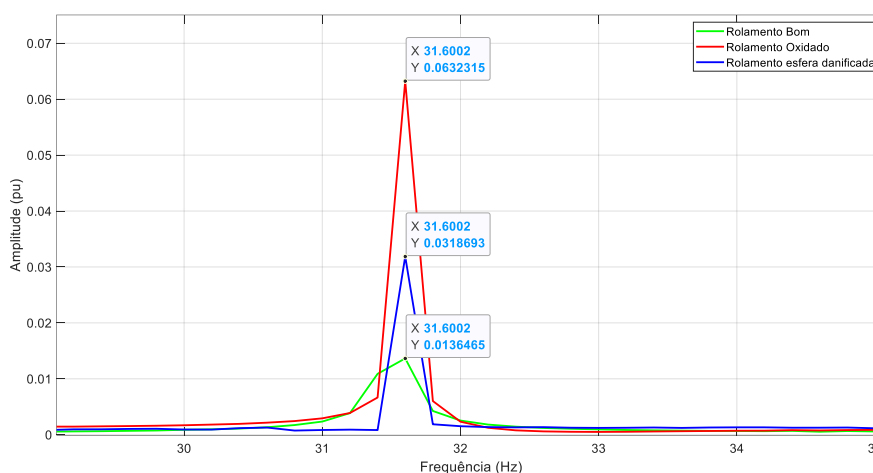
A análise dos espectros apresentados nas Figuras 13 e 14 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, com o motor atuando em sua corrente nominal. Na Figura 13, observa-se que o rolamento bom gera baixas vibrações, com picos sutis indicando que o rolamento está funcionando de maneira eficiente. Por outro lado, o rolamento oxidado apresenta um pico de amplitude mais acentuado em 30 Hz, quando comparado ao rolamento com esferas danificadas. De forma complementar, a Figura 14, correspondente à segunda harmônica (120 Hz), reforça esse comportamento, evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.3 Análise com o Motor operando em corrente de fator de serviço 3,6A.

Considerando o motor de indução operando em sua corrente de fator de serviço de 3,6A, as figuras 15 e 16 mostram respectivamente o espectro de frequência

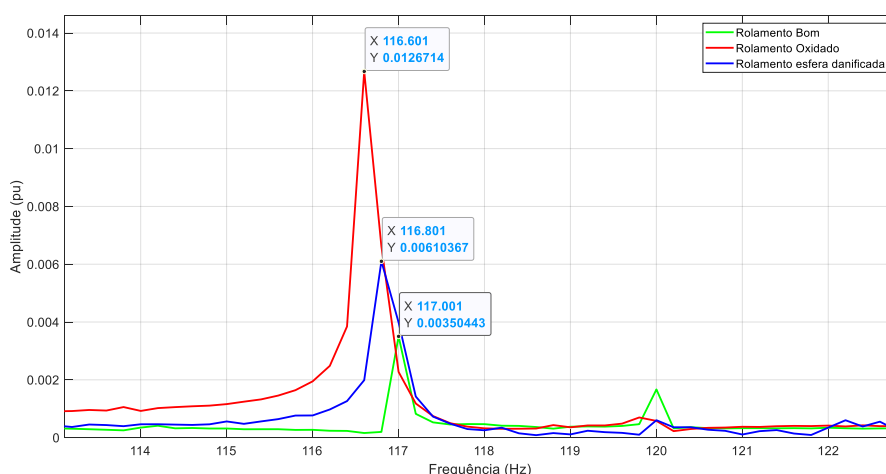
do sinal de BSF, com as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 15 - Espectro próximo à 30 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente de fator de serviço 3,6A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 16 - Espectro 2º harmônica próximo à 120 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente de fator de serviço 3,6A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise dos espectros apresentados nas Figuras 15 e 16 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, com o motor atuando em sua corrente de fator de serviço. Na Figura 15, observa-se que o rolamento bom gera baixas vibrações, com picos sutis indicando que o rolamento está funcionando de maneira eficiente. Por outro lado, o rolamento com esfera danificada e oxidado apresenta um pico de amplitude mais acentuado em 30 Hz. De forma complementar, a Figura 14, apresenta amplitudes elevadas próximas da segunda harmônica (120 Hz), evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.4 Resultados das amplitudes obtidas nos ensaios.

A Tabela 2 ilustra os resultados das amplitudes obtidas nos ensaios realizados. Essa tabela sintetiza os valores registrados para cada ensaio, permitindo uma análise comparativa mais detalhada.

Tabela 2 – Resultado detalhado dos ensaios

		Amplitude (pu)					
Condições de operação do MIT		Frequência (Hz)					
		30	60	90	120	180	300
Rolamento Bom	A vazio	0,001	1	0,0001	0,002	0,01	0,003
	Corrente Nominal 2,8A	0,02	1	0,001	0,002	0,006	0,004
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,01	1	0,0015	0,003	0,004	0
Rolamento com esferas danificadas	A vazio	0,0125	1	0,01	0,031	0,02	0,019
	Corrente Nominal 2,8A	0,049	1	0,029	0,008	0,018	0,008
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,031	1	0,029	0,006	0,009	0,0024
Rolamento Oxidado	A vazio	0,024	1	0,028	0,044	0,025	0,034
	Corrente Nominal 2,8A	0,044	1	0,041	0,025	0,032	0,02
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,063	1	0,03	0,012	0,011	0,0026

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise da tabela 2 mostra que, para o rolamento com esferas danificadas, com o MIT operando em condições "a vazio", a maior amplitude ocorre na frequência de 120 Hz sendo de 0,031 pu. Em contrapartida, nas condições de operação "corrente nominal 2,8A" e "corrente fator de serviço 3,6A", as maiores amplitudes são observadas em 30 Hz sendo de 0,049 pu e 0,031 pu, respectivamente. No caso do rolamento oxidado, as maiores amplitudes são registradas na frequência de 120 Hz, com 0,044 pu para condições de operação do MIT "a vazio". Para condições de "corrente nominal 2,8A" e "corrente fator de serviço 3,6A", as maiores amplitudes são observadas na frequência de 30 Hz, com valores de amplitude de 0,044 pu e 0,063 pu, respectivamente. Este comportamento indica que a frequência de 30 Hz apresenta consistentemente as maiores amplitudes, o que pode ser indicativo de falhas mecânicas ou degradação dos rolamentos, destacando a importância de monitorar as variações de amplitude nas frequências mais relevantes para a detecção precoce de falhas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo investigar a aplicação da análise de vibração por meio da assinatura de corrente elétrica na detecção de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. A metodologia adotada envolveu a simulação de diferentes condições de falha (rolamento oxidado e com esferas danificadas) e a operação do motor sob distintas cargas, com a coleta dos sinais realizada por meio de sensor de corrente SCT013 e posterior análise espectral via Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os resultados obtidos demonstraram variações perceptíveis nas amplitudes dos espectros de frequência, o que permitiu identificar padrões associados a falhas nos rolamentos mesmo em operação a vazio. Esse comportamento valida o uso da análise de corrente como ferramenta não invasiva e de baixo custo para manutenção preditiva.

Em geral, os rolamentos com falhas apresentaram amplitudes mais elevadas nas frequências características (30, 60, 90, 120, 180 e 300 Hz), em comparação ao rolamento em bom estado. Destaca-se, por exemplo, que o rolamento com esferas danificadas operando a vazio gerou amplitude de 0,125 pu em 30 Hz, significativamente superior ao valor correspondente no rolamento sem falhas. Esse padrão de aumento da amplitude nas faixas críticas reforça a eficácia da metodologia proposta para identificar e distinguir o tipo e o grau de degradação dos rolamentos, mesmo sob variações operacionais do motor.

Entretanto, algumas limitações foram observadas ao longo do desenvolvimento. O sistema apresentou sensibilidade a ruídos elétricos, especialmente com o motor alimentado por inversor de frequência, o que inviabilizou ensaios com velocidades variadas. Por esse motivo os ensaios foram realizados via partida direta, e essa interferência ressalta a necessidade de implementar filtros adequados — tanto analógicos quanto digitais — para atenuar distorções e preservar os componentes relevantes da análise espectral.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o uso de técnicas de pré-processamento de sinais com filtros passa-faixa sintonizados nas frequências características de falhas, de modo a reduzir os efeitos do ruído e melhorar a acurácia diagnóstica. Além disso, recomenda-se a aplicação de redes neurais artificiais para a classificação automática das falhas detectadas, considerando os espectros extraídos como vetores de entrada. Essa abordagem pode contribuir para a construção de um sistema inteligente de diagnóstico, capaz de operar em tempo real e com maior robustez frente às variações de carga e às incertezas dos dados de campo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Motores de indução alimentados por conversores de frequência - parâmetros de desempenho e critérios de aplicação. 1.0 ed. Rio de Janeiro, 60 p, 2020.

AZEEZ, Abid Abdul; ALKHEDHER, Mohammad; GADALA, Mohamed S. Thermal imaging fault detection for rolling element bearings. In: **2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, 2020. p. 1-5.

BENITO, Cesar Luís Guimaraes et al. Análise biespectral em sinal de corrente do motor de indução trifásico para detecção de falha no estator Bispectrum analysis in three-phase induction motor current sign with for detection stator fault. 2023.

BIANCHINI, Carolina Alves et al. **Diagnóstico de falhas localizadas de rolamento em motores de indução trifásicos a partir de um modelo matemático**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BRITO, Jorge Nei. **Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos**. 2002. Tese de Doutorado. [sn].

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico]**; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013.

COSTA, Igor Brutkowski Vieira da et al. **Detecção de barra quebrada em rotores de motores de indução através da análise da deformação dinâmica do estator**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DA SILVA PEREIRA, Klariman Yasmin; GRANDE, Campo. Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente. 2021.

DALMOLIM, Alexandre Alves. Bancada didática para ensaios de motores de indução trifásicos. 2019.

DALVAND, Fardin et al. Current noise cancellation for bearing fault diagnosis using time shifting. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 10, p. 8138-8147, 2017.

DEMS, Maria; KOMEZA, Krzysztof. Designing an energy-saving induction motor operating in a wide frequency range. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 69, n. 5, p. 4387-4397, 2021.

DENG, Wu et al. A novel fault diagnosis method based on integrating empirical wavelet transform and fuzzy entropy for motor bearing. **IEEE access**, v. 6, p. 35042-35056, 2018.

DOS SANTOS, HERMAN LUCAS et al. PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA NÃO-INVASIVO UTILIZANDO SINAIS SONOROS PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2019.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. Electric machinery. 2003.

GARCIA, Vilson. Detecção de faltas em motores de indução por meio de campo magnético externo auxiliado por conversor sigma-delta: estudo em rotor com barras rompidas. 2024.

GLOWACZ, Adam. Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor. **Applied Acoustics**, v. 137, p. 82-89, 2018.

HECKBERT, Paul. Fourier transforms and the fast Fourier transform (FFT) algorithm. **Computer Graphics**, v. 2, n. 1995, p. 15-463, 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-26**: Rotating electrical machines - Part 26: Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors. 1.0 ed. International Standard, 21 p, 2006.

LOPES, T. D. et al. Aplicação do Algoritmo Random Forest como Classificador de Padrões de Falhas em rolamentos de Motores de Indução. **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Porto Alegre**, 2017.

MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.

MARTINEZ-HERRERA, Ana L. et al. Multiple fault detection in induction motors through homogeneity and kurtosis computation. **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1541, 2022.

MATEER, Todd. **Fast Fourier transform algorithms with applications**. 2008. Tese de Doutorado. Clemson University. 2008.

MEDEIROS, João Telésforo Nóbrega de. Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico. 2002.

NAYANA, B. R.; GEETHANJALI, Paul. Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5618-5625, 2017.

NISHAT TOMA, Rafia; KIM, Jong-Myon. Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms. **Applied Sciences**, v. 10, n. 15, p. 5251, 2020.

OJAGHI, Mansour; SABOURI, Mahdi; FAIZ, Jawad. Analytic model for induction motors under localized bearing faults. **IEEE Transactions on energy conversion**, v. 33, n. 2, p. 617-626, 2017.

OKWUOSA, Chibuzo Nwabufo; AKPUDO, Ugochukwu Ejike; HUR, Jang-Wook. A cost-efficient MCSA-based fault diagnostic framework for SCIM at low-load conditions. **Algorithms**, v. 15, n. 6, p. 212, 2022.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 2008.

RADECKI, Andrzej et al. Evaluation of a diagnostic information on common electrical faults contained in signals of an inverter-fed AC IM drive with current-oriented control. In: **2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)**. IEEE, 2016. p. 286-291.

RAMALHO, Geraldo Luis Bezerra et al. Detecção de falhas em motores elétricos através da classificação de padrões de vibração utilizando uma rede neural ELM. **Holos**, v. 4, p. 185-194, 2014.

RANJAN, Rakesh; GHOSH, Subrata Kumar; KUMAR, Manoj. Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 234, n. 3, p. 235-242, 2020.

SOUALHI, Moncef et al. Health monitoring of bearing and gear faults by using a new health indicator extracted from current signals. **Measurement**, v. 141, p. 37-51, 2019.

SOUZA, Rodrigo Bastos de. Manutenção inteligente: plataforma para aquisição de dados em atuadores elétricos. 2018.

TAHKOLA, Mikko et al. A novel machine learning-based approach for induction machine fault classifier development—a broken rotor bar case study. **Energies**, v. 15, n. 9, p. 3317, 2022.

TOLIYAT, Hamid A. et al. **Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis**. CRC press, 2012.

VERARDI, Marcelo. Análise do escoamento e da geração de ruído no sistema de ventilação externo de um motor de indução trifásico. 2008.

WANG, Ziwei et al. Fault diagnosis of a rolling bearing using wavelet packet denoising and random forests. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5581-5588, 2017.

WEG, S. A. Guia de especificação— motores elétricos. set. 2024.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

APLICAÇÃO DE REGRAS PARA TRANSFORMAÇÃO DE MODELO INDEPENDENTE DE COMPUTAÇÃO (CIM) PARA MODELO INDEPENDENTE DE PLATAFORMA (PIM): um Estudo de Caso aplicado na Indústria Vidraceira

Flávio Henrique de Oliveira*, Anthon Pedrollo Hax, Maria Sophia Pardinho Da Silva, Pedro Delgado Henriques e Victor Shoiti Satake

RESUMO

Este estudo examina a aplicabilidade de uma instância da Model Driven Architecture (MDA) no desenvolvimento de um sistema de monitoramento da produção industrial para a empresa Vidraceira Temperlândia. A pesquisa tem como objetivo avaliar a capacidade da abordagem MDA em viabilizar a derivação automatizada de artefatos estruturais e comportamentais a partir da modelagem de requisitos expressos em linguagem natural. O processo metodológico envolveu a eliciação de requisitos no ambiente organizacional, resultando na produção de artefatos no nível Computation Independent Model (CIM), tais como cenários de caso de uso descritos em uma gramática BNF proposta, diagramas de caso de uso e protótipos de interface gráfica. Posteriormente, foram aplicadas regras formais de transformação, com base no arcabouço proposto por LEITE (2017), para a geração de modelos no nível Platform Independent Model (PIM), especificamente diagramas de classes e de sequência. Os resultados obtidos evidenciam que a abordagem MDA contribui significativamente para a mitigação de ambiguidades semânticas, para a padronização dos artefatos e para a sistematização do processo de desenvolvimento orientado a modelos. Conclui-se que a instância de MDA investigada apresenta elevado potencial para suportar a transformação de especificações dos requisitos de software em representações formais compatíveis com processos de automação do desenvolvimento de software.

Palavras-chave: Model Driven Architecture; Engenharia de Software; Transformação CIM-PIM.

* Autor correspondente (e-mail): flavio.oliveira@sistemapiep.org.br

Application of Rules for the Transformation from Computation Independent Model (CIM) to Platform Independent Model (PIM): A Case Study Applied in the Glass Industry

ABSTRACT

This study empirically examines the applicability of an instance of Model Driven Architecture (MDA) in the development of an industrial production monitoring system for the company Vidraceira Temperlândia. The research aims to assess the ability of the MDA approach to enable the automated derivation of structural and behavioral artifacts from requirements modeling expressed in natural language. The methodological process involved the elicitation of requirements within the organizational environment, resulting in the production of artifacts at the Computation Independent Model (CIM) level, such as use case scenarios described using a proposed BNF grammar, use case diagrams, and graphical user interface prototypes. Subsequently, formal transformation rules—based on the framework proposed by LEITE (2017), were applied to generate models at the Platform Independent Model (PIM) level, specifically class and sequence diagrams. The results obtained demonstrate that the MDA approach significantly contributes to mitigating semantic ambiguities, standardizing artifacts, and systematizing the model-driven development process. It is concluded that the investigated MDA instance shows strong potential to support the transformation of software requirement specifications into formal representations compatible with software development automation processes.

Key words: Model Driven Architecture; Software Engineering; CIM-to-PIM Transformation.

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos sistemas de software contemporâneos exige abordagens de desenvolvimento que promovam a abstração, a reusabilidade e a adaptabilidade a diferentes plataformas tecnológicas (Kleppe, Warmer e Bast, 2003).

Nesse contexto, a Model Driven Architecture (MDA), preconizada pela Object Management Group (OMG), emerge como uma estratégia robusta para guiar o ciclo de vida do software por meio de modelos, garantindo uma estrutura compreensível e gerenciável. Segundo Duby (2003), o uso do MDA permite aumentar a produtividade e a qualidade do desenvolvimento de software, ao automatizar tarefas repetitivas e reduzir a necessidade de codificação manual. A separação entre o modelo independente de plataforma (PIM) e o modelo específico de plataforma (PSM) facilita a adaptação do sistema a novas tecnologias e requisitos, sem que seja necessário reestruturar toda a aplicação. Essa abordagem também contribui para a reutilização de modelos em diferentes contextos, reduz os custos de manutenção e documentação, e permite detectar falhas de projeto nas fases iniciais, promovendo entregas mais ágeis e sistemas mais robustos.

Este artigo técnico-científico investiga a aplicabilidade empírica de uma instância de MDA proposta por (LEITE, 2017) em um projeto de desenvolvimento de software, especificamente para a otimização de processos na Indústria Vidraceira Temperlândia, com os seguintes objetivos específicos: verificar a viabilidade de aplicar a abordagem em um ambiente real; avaliar sua contribuição na sistematização e automação da modelagem de processos; identificar os benefícios e limitações percebidos no uso da arquitetura orientada a modelos; e analisar o potencial da técnica para gerar artefatos automatizados a partir de modelos, promovendo eficiência e reuso no desenvolvimento de software.

O cenário industrial contemporâneo, exemplificado pela Temperlândia, fundada em 1999 e operante nos segmentos moveleiro, de decoração e produção de vidros temperados, apresenta desafios intrínsecos à gestão de sistemas produtivos de alto volume. A análise preliminar, realizada mediante visita técnica à sede da

empresa, identificou uma lacuna crítica no sistema de gerenciamento de dados produtivos existente: a insuficiência no rastreamento e monitoramento de peças ao longo da linha de produção. Tal deficiência resulta em gargalos operacionais, incremento de retrabalho e comprometimento da eficiência global do processo. O monitoramento reativo de equipamentos, ativado apenas na entrada de uma peça na máquina e frequentemente resultando em inatividade após a conclusão do processo evidencia uma oportunidade substancial para a otimização proativa do fluxo produtivo.

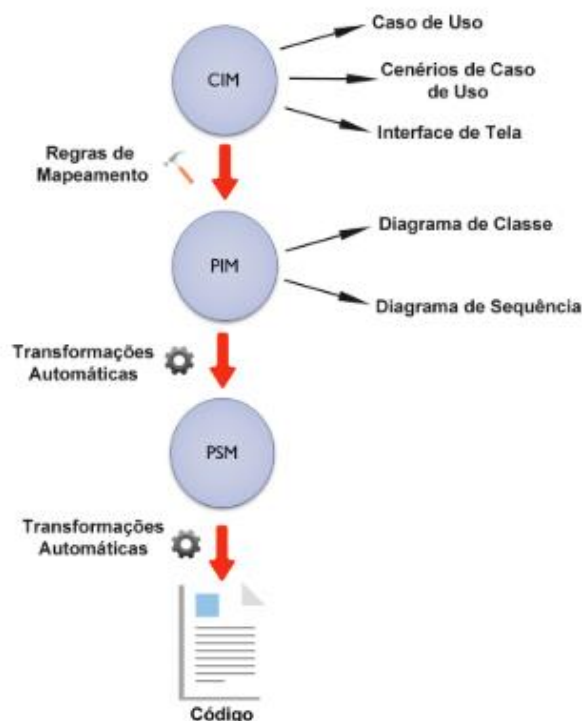
Diante do exposto, o MDA configura-se como uma abordagem metodológica promissora para abordar a supracitada lacuna tecnológica. Ao priorizar a construção de CIM – que representam os requisitos de negócio e as soluções em um nível de alta abstração – é possível derivar PIM, os quais orientam o design de sistemas desalinhados de especificidades tecnológicas. A transformação estruturada entre esses modelos assegura a incorporação dos requisitos de rastreabilidade desde as fases iniciais do projeto, minimizando ambiguidades e facilitando a geração de artefatos de software consistentes (MELLOR, 2004).

A aplicação desta metodologia demonstrou a viabilidade da geração automática de documentos comportamentais e estruturais de software, utilizando a instância de Leite (2017), como base para a transformação de modelos abstratos em concretos, por meio de uma arquitetura MVC (Model-View-Controller). Verificou-se que a ambiguidade e a duplicidade de funcionalidades entre classes podem ser significativamente reduzidas com o emprego de regras de transformação bem definidas. Este estudo evidencia a possibilidade de construir modelos estruturais e dinâmicos diretamente a partir de requisitos expressos em linguagem natural, apesar dos desafios inerentes à formalização dos cenários de caso de uso conforme as regras propostas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Model Driven Architecture (MDA), também conhecida como Arquitetura Dirigida por Modelos, é uma abordagem estruturada para o desenvolvimento de software definida e mantida pelo Object Management Group (OMG). Esse framework propõe a utilização de modelos como elementos centrais do processo de desenvolvimento, permitindo a representação desde os requisitos de negócio até a implementação final em plataformas tecnológicas. A adoção do MDA proporciona maior capacidade de lidar com a complexidade dos sistemas de grande porte, além de favorecer a interoperabilidade e a colaboração entre diversos atores e componentes do ecossistema computacional, incluindo pessoas, organizações, hardware e software (Object Management Group, 2014). Pode-se observar na Figura 1 as fases do MDA, destacando os artefatos empregados em cada etapa do processo.

Figura 1- Fases do MDA e seus artefatos



Fonte: Leite (2017).

As regras da sintaxe BNF (Backus-Naur Form) são utilizadas para a criação das frases dos cenários que especificam os casos de uso, exigindo que as frases dos cenários estejam de acordo com essa sintaxe. Na etapa PIM (Platform Independent Model), são definidos os diagramas de classe e de sequência, os quais são gerados a partir da derivação do diagrama de caso de uso e da interface de tela, seguindo regras estabelecidas com base na gramática BNF desenvolvida no estudo (LEITE, 2017).

Na arquitetura dirigida por modelos (MDA), os sistemas são descritos em diferentes níveis de abstração. O Modelo Independente de Computação (CIM) representa a visão mais abstrata, concentrando-se nos requisitos do sistema e em seu ambiente, sem considerar questões de implementação. Já o Modelo Independente de Plataforma (PIM) descreve a lógica do sistema sem depender de uma plataforma específica, permitindo que o mesmo modelo seja reutilizado em diferentes tecnologias. Por fim, o Modelo Específico de Plataforma (PSM) incorpora detalhes técnicos necessários para a implementação em uma plataforma concreta, combinando a abstração do PIM com elementos específicos da tecnologia-alvo (OMG, 2014).

O Model Driven Architecture propõe a separação entre os aspectos funcionais e técnicos de um sistema, permitindo que a lógica de negócio seja capturada em modelos independentes de plataforma (PIM), os quais podem ser automaticamente transformados em modelos específicos de plataforma (PSM). Essa transformação parte de um modelo computacionalmente independente (CIM), passando pelo PIM, até alcançar implementações concretas, promovendo reuso, adaptabilidade e automatização no processo de desenvolvimento (DUBY, 2003).

O diagrama de caso de uso é amplamente empregado na fase de análise de requisitos por representar as funcionalidades esperadas do sistema. Ele contribui para a identificação e compreensão dos requisitos, permitindo especificar, visualizar e documentar os serviços desejados pelos usuários. Além disso, cada caso de uso descreve uma sequência de interações entre o ator e o sistema, denominada fluxo,

que pode ser composto por um fluxo principal e por fluxos alternativos (GUEDES, 2008).

O diagrama de classes, por ser um diagrama estrutural, tem a função de representar as classes, interfaces, seus atributos, métodos e os relacionamentos entre elas, servindo como base para o projeto orientado a objetos. Esse diagrama é considerado um dos mais relevantes da UML, pois fornece uma visão estática e detalhada da estrutura do sistema, sendo amplamente utilizado na modelagem de software (LARMAN, 2002).

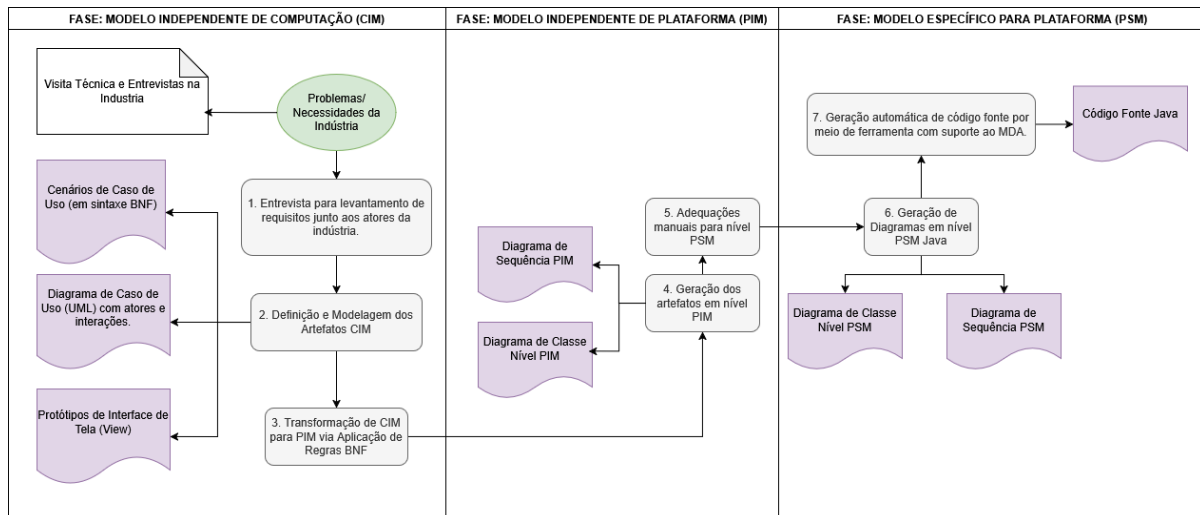
O diagrama de sequência é classificado como um diagrama comportamental da UML e tem como objetivo representar o comportamento dinâmico do sistema, destacando a interação entre os objetos ao longo do tempo. Sua principal característica é evidenciar a ordem temporal das mensagens trocadas entre os objetos participantes de um determinado processo, o que o torna essencial para a compreensão do fluxo de execução de funcionalidades do sistema (GUEDES, 2008).

A separação das responsabilidades entre os componentes de um sistema, como propõe a arquitetura MVC, contribui para a clareza estrutural e facilita a manutenção e evolução do software. Essa abordagem organiza o sistema em três camadas — *model*, *controller* e *view* —, promovendo a independência entre lógica de negócio, interface e controle, o que torna possível realizar alterações localizadas sem comprometer o entendimento global da aplicação (ISIKDAG; UNDERWOOD, 2010).

3. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste projeto é de natureza aplicada, buscando analisar a aplicabilidade prática da instância de MDA em um contexto real da indústria. Especificamente, configura-se como um estudo de caso, ao investigar a fundo a aplicação da instância de MDA em um projeto desenvolvido para a Indústria Vidraceira Temperlândia. A Figura 2 é possível observar uma visão geral da abordagem proposta.

Figura 2 - Visão geral da abordagem proposta



Fonte: Elaboração própria.

A fase inicial do projeto concentrou-se na documentação dos requisitos de negócio de forma desvinculada de qualquer tecnologia computacional. Esta etapa foi crucial para compreender os desafios enfrentados pela Temperlândia, particularmente a ausência de um sistema eficaz de rastreamento e monitoramento de peças ao longo da linha de produção.

O levantamento de requisitos foi realizado por meio de uma visita técnica detalhada às instalações da empresa e entrevistas com especialistas técnicos de informática da empresa. Essa imersão permitiu identificar que, embora a empresa já utilizasse um sistema geral de gerenciamento de dados produtivos, havia uma necessidade premente de melhoria no processo de rastreamento de peças e no monitoramento de equipamentos. Problemas como gargalos operacionais, aumento de retrabalho e perda de eficiência foram diretamente atribuídos à falta de visibilidade contínua sobre o status e a posição dos itens no processo produtivo.

A partir da coleta de informações, foram construídos os principais artefatos do nível CIM, incluindo diagramas de casos de uso em UML, que representam as funcionalidades do sistema com a identificação clara dos atores e suas respectivas interações; cenários de casos de uso descritos em sintaxe BNF, seguindo rigorosamente as regras dessa notação conforme estabelecido na metodologia; e

protótipos de interfaces de tela, elaborados manualmente para cada caso de uso com interação de usuário, com o objetivo de garantir a rastreabilidade em relação aos casos de uso levantados e assegurar a usabilidade para os potenciais usuários.

A fase CIM, com seus artefatos detalhados, permitiu uma compreensão profunda dos processos internos da Temperlândia, identificando pontos críticos e guiando a proposta de uma solução de monitoramento integrada, essencial para a fase subsequente.

Esta é uma das etapas mais críticas e inovadoras da metodologia, pois aborda a lacuna na literatura sobre a transformação sistemática de CIM para PIM, um processo frequentemente realizado manualmente. A proposta metodológica utilizou regras de transformação baseadas na sintaxe BNF para especificação da UML, conforme expandido por Leite (2017). A ideia central é associar cada símbolo terminal da BNF (como sujeito, verbo, objeto e complemento) diretamente a elementos da UML, como classes de domínio, operações, atributos e relacionamentos.

Nesta fase de geração dos artefatos do nível PIM, o foco reside na modelagem do sistema de forma abstrata, ainda sem considerar a plataforma de implementação. Os artefatos PIM são derivados diretamente dos casos de uso definidos na etapa CIM. Os principais artefatos gerados incluem:

A transição de CIM para PIM, embora manual em alguns aspectos, foi sistemática e guiada pelas regras de transformação, o que garantiu a consistência dos modelos e permitiu a incorporação dos requisitos de rastreabilidade desde as fases iniciais do projeto

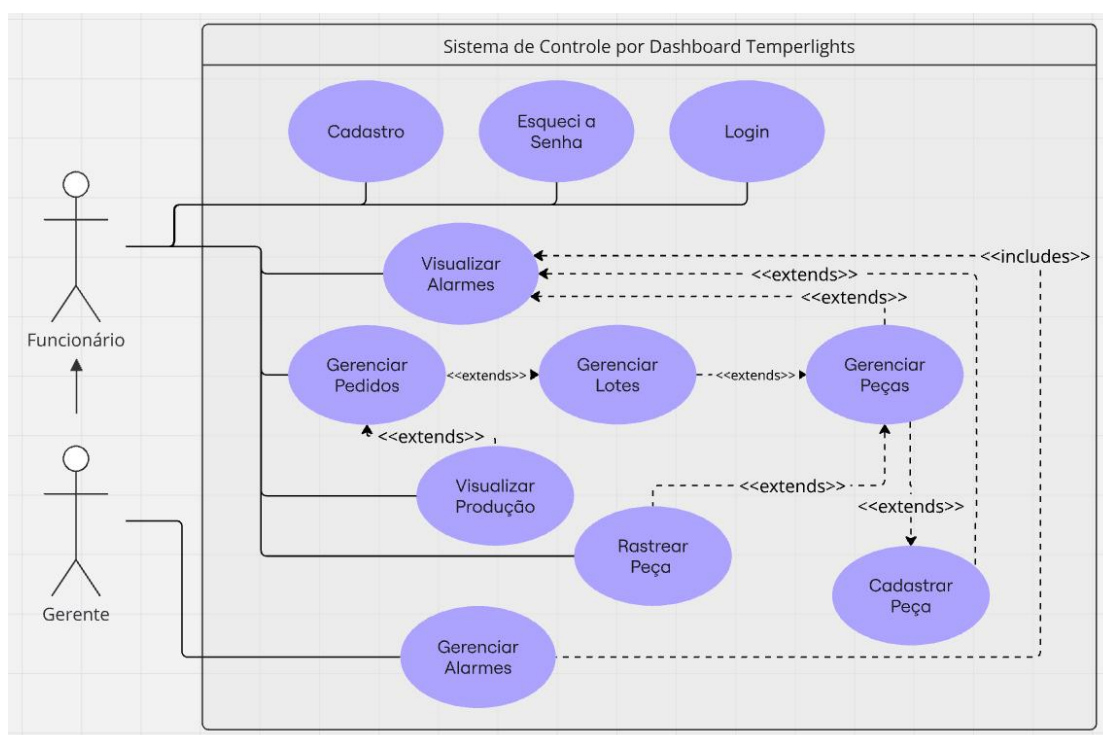
A etapa subsequente envolve as adequações para o PSM e a geração de código. Enquanto a transformação de PIM para PSM é mais amplamente discutida na literatura e suportada por ferramentas MDA que permitem sua automação, neste projeto, as adequações para o nível PSM foram consideradas, ainda que não detalhadas exaustivamente como as de CIM para PIM.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, será apresentado um cenários dos casos de uso e interfaces de tela correspondentes à fase CIM, bem como sua derivação no diagrama de classe e sequência referentes à fase PIM.

Na Figura 3 apresenta o diagrama de caso de uso consolidado, no qual estão representadas todas as funcionalidades mapeadas durante a fase de elicitación de requisitos.

Figura 3 - Resultado do diagrama de caso de uso completo.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 4 apresenta o protótipo da interface desenvolvido para o caso de uso Gerenciar Lote. Nesta interface, o usuário pode visualizar diversos indicadores de desempenho, tais como a quantidade de peças em andamento, número de alertas, peças finalizadas e volume de perdas. Além disso, a tela exibe uma listagem detalhada do status individual de cada peça, destacando o tempo ocioso de cada uma, o que permite a identificação de potenciais perdas no processo produtivo.

Figura 4 - Protótipo de tela do caso de uso gerenciar lote.



Fonte: Elaboração própria.

Cada sentença do cenário do caso de uso foi estruturada de acordo com a sintaxe estabelecida pela metodologia adotada, possibilitando sua derivação sistemática para o diagrama de classes com base nas regras propostas por Leite (2017). Como ilustração da aplicação dessas regras, utiliza-se o fluxo principal do caso de uso Gerenciar Peça. A seguir, apresentam-se as sentenças extraídas, acompanhadas das respectivas regras aplicadas e suas derivações correspondentes.

Frase 1 – “Usuário insere código de barras da peça”. A análise da sentença permite identificar a presença do verbo “insere”, o qual caracteriza uma ação de entrada de dados por parte do usuário ou de um agente automatizado. De acordo com as regras de derivação e aprimoramento realizados, esta estrutura indica que a entidade Peça deve conter um atributo denominado código de barras. Assim, no diagrama de classes, é modelada a classe Peça, à qual é associado o atributo código de barras, representando a informação capturada pelo sistema por meio do usuário.

Frase 2 – “Usuário envia código de barras da peça”. A análise da sentença revela que o sujeito da ação “Usuário” difere de sistema, o que, segundo as regras de derivação estabelecidas, implica a criação de duas classes auxiliares: uma de interface (View) e uma de controle (Controller), ambas nomeadas com o prefixo do

caso de uso correspondente — neste caso, *V_GerenciarPeça* e *C_GerenciarPeça*, respectivamente. Em ambas as classes, é definido o método *enviaCódigo(código)*, responsável por encapsular o dado transmitido.

No diagrama de sequência, a derivação implica na representação de duas mensagens: a primeira, originada no agente Usuário em direção à classe View, e a segunda, da View para a Controller, evidenciando o fluxo de dados dentro da arquitetura MVC.

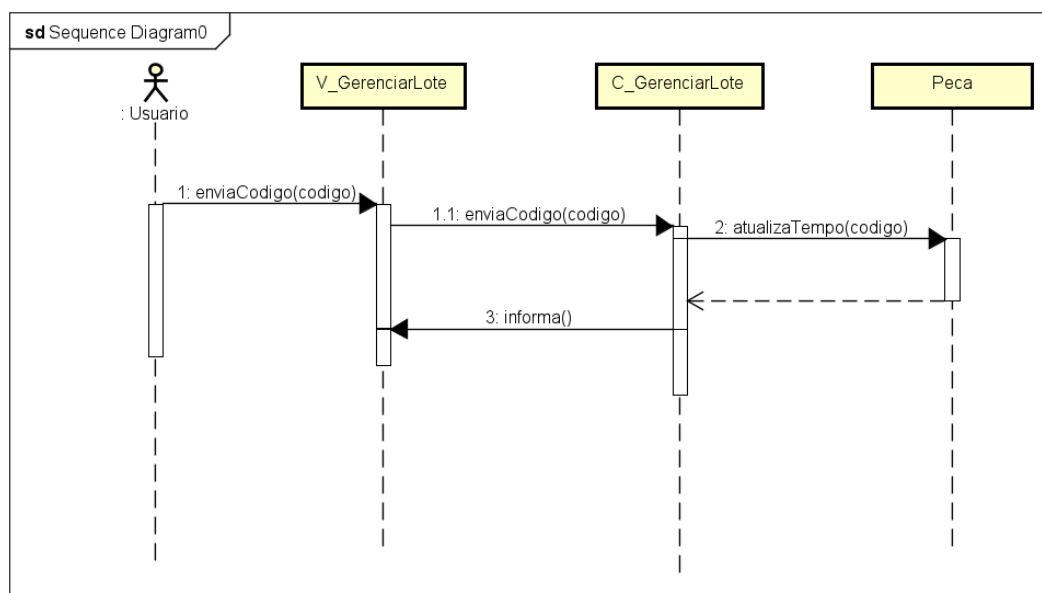
Frase 3 – “Sistema atualiza tempo inicial da peça”. A sentença segue a estrutura sintática do tipo: *<sujeito> <verbo> <objeto> <complemento 1> <complemento 2> <complemento 3>*. Ao analisar o sujeito, observa-se que ele corresponde ao próprio sistema, o que, conforme as diretrizes metodológicas, indica que a operação é realizada internamente pelo sistema sobre uma entidade do domínio. Dessa forma, no diagrama de classes, deriva-se a inclusão do método *atualizaTempo()* na classe *Peça*, representando a ação de atualização do atributo de tempo. No diagrama de sequência, a derivação implica em uma mensagem enviada da classe *Controller* para a classe *Peça*, invocando o método *atualizaTempo(codigo)*, evidenciando a lógica de controle exercida sobre a entidade do modelo.

Frase 4 – “Sistema informa código de peça”. A sentença segue a estrutura sintática *<sujeito> <verbo> <objeto direto> <complemento 1> <complemento 2>*, na qual o sujeito “Sistema” executa a ação. O verbo “informa” é classificado, conforme as regras de derivação propostas, como uma palavra reservada, indicando que há uma comunicação do Controller para a View.

Dessa forma, no diagrama de sequência, deriva-se uma mensagem originada na classe Controller em direção à classe View, por meio do método *informa(msg)*, cujo parâmetro contém o conteúdo a ser exibido, neste caso, o código das peças.

O resultado pode-se observar na Figura 5 diagrama de sequência após derivações realizadas dos cenários de caso de uso de gerenciar lote.

Figura 5- Diagrama de sequência resultante da derivação do fluxo principal



Fonte: Elaboração própria.

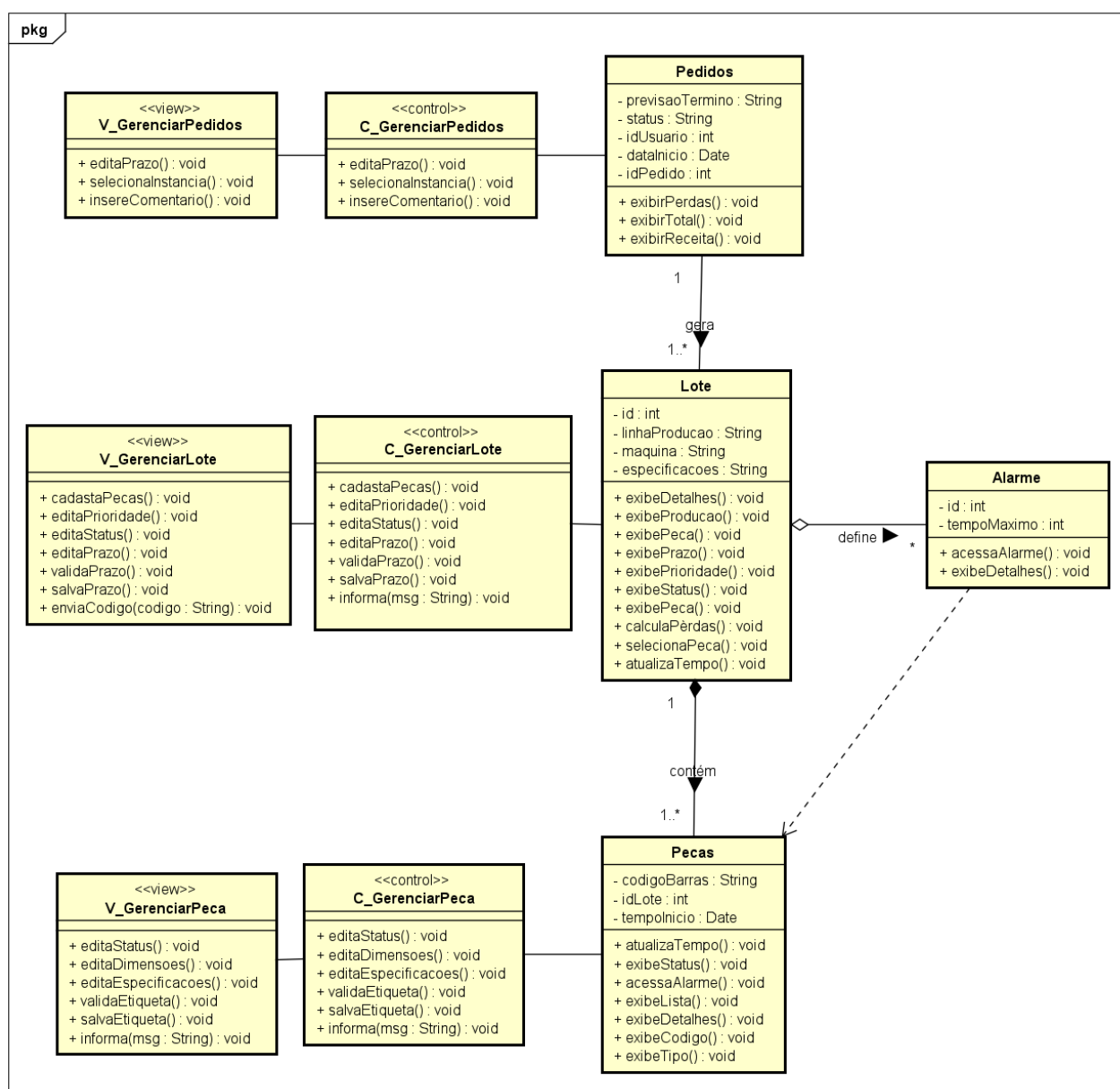
O modelo gerado pode, por meio da utilização de uma ferramenta com suporte à transformação automática do PSM para código fonte, viabilizar a geração automática do código na plataforma de destino desejada. Dessa forma, obtém-se um esqueleto de aplicação contendo as estruturas de classes e a definição dos métodos correspondentes, cabendo ao desenvolvedor a responsabilidade de implementar a lógica interna de cada método conforme os requisitos funcionais. Essa estrutura sistematizada promove um mapeamento direto entre os requisitos especificados, o modelo derivado e o código gerado, permitindo também a rastreabilidade bidirecional entre esses elementos ao longo do processo de desenvolvimento.

Na Figura 6 ilustra o diagrama de classes correspondente à modelagem completa do sistema, obtido a partir da derivação sistemática das sentenças extraídas dos cenários de casos de uso, por meio da aplicação das regras previamente definidas no processo de transformação. Após a geração inicial sistemática dos elementos estruturais, procedeu-se à realização de uma análise manual minuciosa, com o objetivo de estabelecer adequadamente os relacionamentos entre as classes identificadas, bem como definir de forma precisa as multiplicidades associadas a

essas relações, garantindo assim a coerência e a integridade semântica do modelo gerado.

O modelo gerado pode, por meio da utilização de uma ferramenta com suporte à transformação automática do Modelo Específico de Plataforma (PSM) para código fonte, viabilizar a geração automática do código na plataforma de destino desejada.

Figura 6 - Diagrama de classe completo



Fonte: Elaboração própria.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da instância metodológica proposta evidenciou-se eficaz na sistematização e automação parcial da modelagem de processos, permitindo a derivação consistente de artefatos estruturais e comportamentais a partir de requisitos expressos em linguagem natural.

A abordagem orientada a modelos contribuiu significativamente para a mitigação de ambiguidades semânticas, padronização de artefatos e rastreabilidade entre os elementos que compõem as etapas de análise, projeto e futura implementação. Dentre os benefícios observados, destacam-se a clareza na comunicação entre os stakeholders, a reutilização de modelos e a redução do esforço manual nas fases subsequentes do ciclo de desenvolvimento.

O processo sistematizado de transformação de modelos CIM para PIM demonstrou ser eficaz em promover consistência e alinhamento com os princípios da engenharia de software orientada a modelos. Nesse contexto, a construção de uma ferramenta de apoio que automatize integralmente esse processo mostra-se tecnicamente viável e desejável. Tal solução potencializaria os benefícios esperados da MDA, como a agilidade no desenvolvimento, o reuso de artefatos e a integração entre requisitos e implementação, consolidando-se como um recurso estratégico para ambientes industriais que demandam alta confiabilidade e produtividade.

Apesar dos avanços, identificaram-se limitações associadas à necessidade de formalização rigorosa dos cenários de caso de uso e à dependência de regras bem definidas para garantir a qualidade das transformações. Tais desafios apontam para a importância da capacitação técnica e da validação contínua durante a aplicação prática da metodologia. Nesse cenário, uma proposta promissora consiste na incorporação de soluções baseadas em *Large Language Models (LLMs)* para apoiar a adequação de textos em linguagem natural aos padrões exigidos pelas regras de transformação. A utilização de LLMs pode contribuir significativamente para a conversão automática e coerente de descrições informais em estruturas formais compatíveis com os modelos exigidos pela MDA, reduzindo o esforço humano e aumentando a aderência à metodologia.

REFERÊNCIAS

DUBY, Carolyn K. *Accelerating embedded software development with a Model Driven Architecture®*. Pathfinder Solutions, set. 2003. Disponível em: https://www.omg.org/mda/mda_files/MDA_overview.pdf. Acesso em: 26 jun. 2025.

GUEDES, G. T. *UML 2 – uma abordagem prática*. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2008.

ISIKDAG, U.; UNDERWOOD, J. Two design patterns for facilitating building information model-based synchronous collaboration. *Automation in Construction*, Amsterdam, v. 19, n. 5, p. 544–553, 2010.

KLEPPE, Anneke G.; WARMER, Jos B.; BAST, Wim. *MDA explained: the model driven architecture: practice and promise*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2003.

LEITE, V. M. Uma instância de uma arquitetura orientada a modelo e suas implicações na implantação dos processos do MPS.BR. 2017. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

MELLOR, Stephen J. *MDA distilled: principles of model-driven architecture*. Boston: Addison-Wesley Professional, 2004.

OMG. *MDA Guide Version 2.0*. [S.l.], 2014. Disponível em: <https://www.omg.org/cgi-bin/doc?ormsc/14-06-01.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2025.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

REDUÇÃO DE DIMENSIONALIDADE, RANQUEAMENTO E PREDIÇÃO DE CPUs E GPUS COM CIÊNCIA DE DADOS E MACHINE LEARNING

Davi Coene Rosa, Eduardo Peres Mosena, Tiago Rafael Wengrat e Thiago Schaedler Uhlmann*

RESUMO

Este artigo explora a aplicação prática da Ciência de Dados na análise comparativa de dados técnicos sobre unidades de processamento gráfico (GPUs) e unidades centrais de processamento (CPUs). Utilizando técnicas de manipulação, visualização e extração de conhecimento a partir de um banco de dados especializado, busca-se evidenciar padrões de desempenho, consumo e arquitetura entre esses dois componentes fundamentais da computação moderna, e descobrir o melhor processador e placa de vídeo nessa base de dados. O estudo fundamenta-se em princípios estatísticos e técnicas de análise exploratória de dados. A proposta visa não apenas ilustrar o potencial da Ciência de Dados em contextos técnicos, mas também contribuir com insights para decisões em áreas como engenharia de software, arquitetura de sistemas e inteligência artificial.

Palavras-chave: Ciência de Dados, GPU, CPU, Banco de Dados, Machine Learning.

DIMENSIONALITY REDUCTION, RANKING AND PREDICTION OF CPUs AND GPUS WITH DATA SCIENCE AND MACHINE LEARNING

ABSTRACT

This article explores the practical application of Data Science in the comparative analysis of technical data on Graphics Processing Units (GPUs) and Central Processing Units (CPUs). By employing techniques of data manipulation, visualization, and knowledge extraction from a specialized database, the study aims to highlight performance, power consumption, and architectural patterns between these two fundamental components of modern computing, and to identify the best processor and graphics card within the dataset. The study is grounded in statistical principles and exploration data analysis techniques. This approach not only illustrates the potential of Data Science in technical contexts but also provides valuable insights for decision-making in fields such as software engineering, system architecture, and artificial intelligence.

Key words: Data Science, GPU, CPU, Database, Machine Learning.

* Autor correspondente (e-mail): thiago.uhlmann@sistemapiep.org.br

1. INTRODUÇÃO

A Ciência de Dados tem se consolidado como um dos campos mais relevantes da era digital, promovendo *insights* que impactam desde decisões empresariais até avanços na pesquisa científica. No contexto tecnológico, um dos maiores focos de interesse reside na análise de hardware computacional, especialmente das unidades centrais de processamento (CPU) e das unidades de processamento gráfico (GPU), que constituem a espinha dorsal de qualquer sistema computacional de alto desempenho. A crescente demanda por sistemas eficientes, principalmente em áreas como computação científica, jogos, aprendizado de máquina e simulações em tempo real, torna indispensável uma compreensão aprofundada do desempenho e da evolução desses componentes. De acordo com Provost e Fawcett (2013), “a Ciência de Dados é a extração de conhecimento a partir de grandes volumes de dados por meio de análise, aprendizado e inferência”. Sob esse prisma, a presente pesquisa propõe a aplicação dessa ciência à avaliação de métricas técnicas de GPUs e CPUs, a partir de um banco de dados estruturado.

O objetivo deste artigo é descobrir entre as variáveis quais são os melhores GPUS e CPUS dentro dessa base de dados e apresentar uma análise orientada por dados que permita compreender, por meio de estatísticas descritivas e visualizações, como diferentes modelos de GPUs e CPUs se comportam em aspectos como frequência de clock, número de núcleos, TDP (*Thermal Design Power*), processos de fabricação e benchmarks de desempenho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ciência de Dados

A Ciência de Dados é um campo interdisciplinar que une estatística, aprendizado de máquina, mineração de dados e computação para processar e interpretar grandes volumes de informação. Segundo Dhar (2013), “*Data Science* é a

nova forma de ciências empíricas, pois trabalha com grandes conjuntos de dados para modelar fenômenos complexos, com base em padrões observáveis”. Seu valor reside na capacidade de transformar dados brutos em inteligência aplicável, muitas vezes por meio de *pipelines* automatizados de análise.

2.2 Estatística

A Estatística é uma ciência que coleta, organiza, analisa e interpreta dados com o objetivo de apoiar a tomada de decisões em condições de incerteza. Seu papel é essencial em diversas áreas do conhecimento, como economia, biologia, engenharia, medicina, ciências sociais, entre outras (TRIOLA, 2019). A Estatística pode ser dividida em dois grandes ramos: a Estatística Descritiva, que resume e descreve as principais características de um conjunto de dados, e a Estatística Inferencial, que utiliza uma amostra para tirar conclusões sobre uma população.

Os principais conceitos da Estatística envolvem medidas de tendência central (média, mediana e moda), medidas de dispersão (desvio padrão, variância e amplitude) e distribuição de probabilidades. Além disso, a aplicação de testes de hipóteses e modelos de regressão são amplamente utilizados em pesquisas quantitativas, oferecendo embasamento científico para validação de hipóteses e previsão de comportamentos (MONTGOMERY; RUNGER, 2020).

A utilização da Estatística vem crescendo exponencialmente com a era dos dados. Em um cenário dominado por *big data* e análise preditiva, o conhecimento estatístico tornou-se uma ferramenta indispensável para cientistas de dados, gestores e pesquisadores, contribuindo significativamente para a extração de valor e geração de conhecimento a partir de grandes volumes de dados.

2.3 Linguagem de programação

Linguagens de programação são conjuntos estruturados de regras e símbolos que permitem a comunicação entre seres humanos e computadores, facilitando o desenvolvimento de algoritmos e a construção de sistemas computacionais. Elas permitem que instruções sejam dadas ao computador de forma lógica e

compreensível, transformando ideias humanas em operações automatizadas (SEBESTA, 2012). As linguagens são classificadas em diferentes paradigmas, como imperativo, funcional, orientado a objetos e lógico, cada um com abordagens distintas de resolução de problemas computacionais.

A escolha da linguagem de programação depende de diversos fatores, como desempenho, facilidade de uso, aplicação desejada e suporte da comunidade. Por exemplo, linguagens como C e C++ são amplamente utilizadas em sistemas embarcados e aplicações que exigem alto desempenho, enquanto *Python* e *JavaScript* são preferidas em aplicações *web* e ciência de dados por sua sintaxe simples e ampla variedade de bibliotecas (TANENBAUM; BOS, 2015). Independentemente da linguagem escolhida, o domínio desses sistemas simbólicos é essencial para o desenvolvimento de soluções tecnológicas eficazes, sendo uma competência fundamental para profissionais da computação.

2.4 Ciências de Dados

A Ciência de Dados é uma área interdisciplinar que combina estatística, ciência da computação e conhecimento de domínio para extrair *insights* e conhecimento útil a partir de grandes volumes de dados. Seu objetivo principal é transformar dados brutos em informações valiosas para tomada de decisões, utilizando técnicas de análise exploratória, modelagem preditiva, visualização e aprendizado de máquina (PROVOST; FAWCETT, 2013).

Os profissionais da área — conhecidos como cientistas de dados — utilizam linguagens como *Python* e R, bancos de dados relacionais e não relacionais, além de ferramentas de *big data* e bibliotecas de *machine learning* para manipular, processar e interpretar conjuntos de dados cada vez mais complexos. A Ciência de Dados tornou-se fundamental em setores como saúde, finanças, marketing, segurança e tecnologia, sendo considerada uma das profissões mais promissoras do século XXI (MARR, 2016).

Além da parte técnica, a Ciência de Dados envolve forte pensamento crítico, curiosidade investigativa e capacidade de comunicação, pois os dados, por si só, não

possuem valor se não forem contextualizados e compreendidos de forma acessível pelos tomadores de decisão.

2.5 Bancos de Dados

Bancos de dados são estruturas organizadas para armazenamento, gerenciamento e recuperação de informações. Em análises modernas, bancos do tipo CSV (*Comma-Separated Values*) ou SQL são amplamente utilizados em tarefas de Ciência de Dados. De acordo com Elmasri e Navathe (2015), “a modelagem eficiente e a integridade dos dados são fatores críticos para análises confiáveis e extração de conhecimento real”. No caso do presente trabalho, a análise será feita sobre um *dataset* técnico contendo especificações de diferentes modelos de CPUs e GPUs. A manipulação desses dados exige tratamento de inconsistências, normalização e seleção de variáveis relevantes — tarefas típicas da fase de pré-processamento em *Data Science* (Han, Pei & Kamber, 2011).

2.6 CPU e GPU: Arquitetura e Aplicações

A CPU (*Central Processing Unit*) é projetada para lidar com tarefas sequenciais e decisões lógicas rápidas, enquanto a GPU (*Graphics Processing Unit*) se destaca por seu poder de processamento paralelo massivo, fundamental para tarefas de computação gráfica e algoritmos de inteligência artificial. Como pontua Hennessy e Patterson (2011), “GPUs representam a maior evolução arquitetônica da computação paralela nas últimas duas décadas”. Ambos os componentes evoluíram significativamente, refletindo-se em diferentes métricas: litografia (nm), número de threads, caches, largura de banda e consumo térmico. A análise desses dados permite observar tendências de desenvolvimento, relação custo-benefício e limites físicos da microarquitetura.

2.7 Linguagem R

A linguagem R é um ambiente e linguagem de programação voltado principalmente para análise estatística, mineração de dados e gráficos. Criada por Ross Ihaka e Robert Gentleman na década de 1990, R se destaca por ser *open source* e por sua grande comunidade acadêmica e científica. É amplamente utilizada em estatística aplicada, bioinformática, econometria, aprendizado de máquina e ciência de dados (R CORE TEAM, 2024).

Uma das maiores vantagens do R é sua vasta coleção de pacotes disponíveis através do CRAN (*Comprehensive R Archive Network*), que permite aos usuários implementar desde análises estatísticas básicas até modelos complexos de *machine learning*. Além disso, o R oferece ferramentas poderosas de visualização gráfica, como os pacotes ggplot2 e lattice, que possibilitam a criação de gráficos altamente customizáveis e de alta qualidade (WICKHAM; GROLEMUND, 2017).

Do ponto de vista acadêmico e científico, R é valorizado por sua reprodutibilidade, capacidade de integração com outras linguagens (como Python e C++) e forte apoio da comunidade científica. Seu uso vem crescendo também em ambientes corporativos devido à sua robustez na manipulação de grandes volumes de dados e sua aplicabilidade em áreas como finanças, saúde e marketing (R CORE TEAM, 2024; WICKHAM; GROLEMUND, 2017).

2.8 Machine Learning

O *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) é uma subárea da inteligência artificial que estuda algoritmos capazes de aprender padrões a partir de dados, sem a necessidade de programação explícita para cada tarefa. Essa abordagem permite que os sistemas adaptem seu comportamento com base em experiências anteriores, o que tem impulsionado sua aplicação em áreas como diagnósticos médicos, previsões financeiras, reconhecimento de padrões e automação industrial (ALPAYDIN, 2020).

Os algoritmos de aprendizado de máquina podem ser classificados em três grandes categorias: aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado e aprendizado por reforço. No aprendizado supervisionado, os modelos são treinados com dados rotulados e buscam prever um resultado com base em exemplos anteriores. Já o aprendizado não supervisionado, busca descobrir padrões ocultos em conjuntos de dados sem rótulos. O aprendizado por reforço, por sua vez, envolve a tomada de decisões por agentes autônomos que aprendem a partir de recompensas e penalidades recebidas em um ambiente (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

O crescimento no volume de dados e o aumento da capacidade computacional têm favorecido o uso do Machine Learning em soluções cada vez mais complexas e escaláveis, tornando-se um pilar fundamental da transformação digital nas organizações.

2.9 Análise descritiva

A análise descritiva é uma das etapas fundamentais da estatística e da ciência de dados, voltada para o resumo e interpretação de dados com o objetivo de entender suas principais características antes da aplicação de modelos preditivos ou inferenciais. Por meio de técnicas como medidas de tendência central (média, mediana e moda), medidas de dispersão (desvio padrão, variância e amplitude), tabelas de frequência e representações gráficas, a análise descritiva permite uma visualização clara do comportamento dos dados (TRIOLA, 2019).

Essa etapa é essencial para identificar padrões, outliers, tendências e possíveis erros nos dados, servindo como base para tomadas de decisão mais embasadas. Ferramentas como histogramas, *boxplots* e gráficos de dispersão são amplamente utilizadas para ilustrar os dados de maneira acessível, facilitando a comunicação entre analistas e gestores (MONTGOMERY; RUNGER, 2020).

Em contextos corporativos e acadêmicos, a análise descritiva é considerada o primeiro passo de qualquer processo analítico, pois fornece um diagnóstico inicial que

orienta as etapas seguintes da investigação, como a modelagem estatística ou o uso de algoritmos de *machine learning*.

2.10 Análise preditiva

A análise preditiva é uma técnica estatística e computacional que utiliza dados históricos, algoritmos de *machine learning* e modelos matemáticos para prever eventos futuros ou comportamentos prováveis. Trata-se de uma evolução da análise descritiva e inferencial, pois além de entender e explicar os dados, seu objetivo é antecipar resultados com base em padrões previamente identificados (SHMUELI; KOPPIUS, 2011).

Esse tipo de análise é amplamente utilizado em setores como finanças, *marketing*, saúde e logística para prever riscos, otimizar recursos, identificar fraudes e melhorar a tomada de decisões. Entre os métodos mais comuns estão regressão linear e logística, redes neurais artificiais, árvores de decisão, máquinas de vetor de suporte (SVM) e modelos baseados em séries temporais (JAMES et al., 2021).

A eficácia da análise preditiva depende da qualidade dos dados utilizados, do conhecimento do domínio de aplicação e da validação rigorosa dos modelos construídos. Quando bem implementada, ela permite às organizações obter vantagem competitiva ao antecipar cenários e agir de forma proativa.

2.11 K-means

O algoritmo *K-means* é uma técnica de aprendizado não supervisionado amplamente utilizada para agrupamento (*clustering*) de dados. Seu objetivo é particionar um conjunto de dados em K grupos distintos, de modo que os objetos dentro de um mesmo grupo sejam mais semelhantes entre si do que aos objetos dos outros grupos (MACQUEEN, 1967). Para isso, o algoritmo define K centroides iniciais e atribui cada ponto de dados ao centroide mais próximo, recalculando as posições dos centroides iterativamente até que a convergência seja alcançada.

K-means é valorizado por sua simplicidade, eficiência computacional e aplicabilidade em diversas áreas, como segmentação de clientes, análise de imagens

e bioinformática. Contudo, o algoritmo possui limitações, como a necessidade de pré-definir o número K de clusters e a sensibilidade a pontos fora da curva (*outliers*) e à escolha dos centroides iniciais, o que pode levar a soluções subótimas (JAIN, 2010).

Para mitigar essas limitações, variantes do algoritmo e métodos de validação de *clusters*, como o método do cotovelo (*elbow method*), são frequentemente utilizados para determinar o número ideal de grupos e melhorar a estabilidade do agrupamento.

2.12 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística utilizada para reduzir a dimensionalidade de conjuntos de dados multidimensionais, mantendo a maior parte da variabilidade presente nos dados originais. O PCA transforma variáveis correlacionadas em um novo conjunto de variáveis ortogonais, chamadas componentes principais, que são ordenadas de acordo com a quantidade de variância que explicam (JOLLIFFE, 2002).

Essa redução dimensional facilita a visualização, o processamento e a modelagem de dados, especialmente quando se trabalha com grandes volumes de informações ou com muitas variáveis. O PCA é amplamente utilizado em áreas como reconhecimento de padrões, compressão de dados e análise exploratória, auxiliando na identificação de estruturas latentes nos dados (WICKHAM, 2017).

Embora eficiente, o PCA assume linearidade nas relações entre variáveis e que os componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, o que pode limitar seu desempenho em dados altamente não lineares (JOLLIFFE, 2002).

3 ANÁLISE DESCRITIVA

A análise descritiva é uma etapa fundamental no processo de interpretação e exploração de conjuntos de dados. Seu principal objetivo é oferecer uma visão panorâmica sobre o comportamento das variáveis envolvidas, permitindo identificar padrões, inconsistências, tendências centrais e dispersões. No presente trabalho,

foram analisadas variáveis técnicas extraídas de um banco de dados contendo informações sobre unidades de processamento central (CPUs) e unidades de processamento gráfico (GPUs). Os dados analisados incluem consumo energético (TDP), tamanho do chip (*Die Size*), litografia, frequência de operação, número de transistores, entre outros.

Com a análise descritiva é possível retirar alguns tópicos muito importantes, uma delas é ter a visão geral de como se comporta a base de dados, como a da GPU, quanto a CPU, com isso foram realizados alguns cálculos estatísticos para observar como esses dados se comportam.

3.2 Categorização e Tabela de Frequências

Inicialmente, realizou-se a identificação e separação das variáveis do *dataset* em dois grupos principais: variáveis numéricas e variáveis categóricas. Entre as numéricas, destacam-se: TDP (W), *Die Size* (mm²), Freq. (MHz), *Transistors* (milhões) e *Process Size* (nm). As variáveis categóricas incluíram *Type*, *Vendor*, *Foundry* e *Product*.

Essa classificação inicial é essencial para a aplicação correta das técnicas estatísticas posteriores, uma vez que cada tipo de variável exige um tratamento distinto quanto à agregação, modelagem e visualização.

Figura 1 – Categorização dos dados

```
'data.frame': 4854 obs. of 14 variables:
 $ X      : int  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ...
 $ Product: chr  "AMD Athlon 64 3500+" "AMD Athlon 200GE" "Intel Core i5-1145G7" "Intel Xeon E5-2603 v2" ...
 $ Type   : chr  "CPU" "CPU" "CPU" "CPU" ...
 $ Release.Date: chr  "2007-02-20" "2018-09-06" "2020-09-02" "2013-09-01" ...
 $ Process.Size..nm.: num  65 14 10 22 45 22 65 65 10 90 ...
 $ TDP..W.: num  45 35 28 80 125 95 125 130 28 89 ...
 $ Die.Size..mm.2.: num  77 192 NA 160 258 160 285 140 NA 156 ...
 $ Transistors..million.: num  122 4800 NA 1400 758 1400 450 376 NA 154 ...
 $ Freq..MHz.: num  2200 3200 2600 1800 3700 2400 2400 3000 2000 2200 ...
 $ Foundry  : chr  "Unknown" "Unknown" "Intel" "Intel" ...
 $ Vendor   : chr  "AMD" "AMD" "Intel" "Intel" ...
 $ FP16.GFLOPS: num  NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
 $ FP32.GFLOPS: num  NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
 $ FP64.GFLOPS: num  NA NA NA NA NA NA NA NA NA ...
Colunas numéricas:
X Process.Size..nm. TDP..W. Die.Size..mm.2. Transistors..million. Freq..MHz. FP16.GFLOPS FP32.GFLOPS FP64.GFLOPS
Colunas categóricas:
Product Type Release.Date Foundry Vendor
```

Começando com a categorização dos dados, para definir os seus tipos, assim conseguindo escolher quais as variáveis melhores para trabalhar.

Em seguida, foi construída duas tabelas de frequências para a variável TDP, a primeira tabela é da CPU, enquanto a outra fala a cerca da GPU, e assim foi-se dividindo os dados em classes. Para definir os intervalos, utilizou-se a Regra de *Sturges*, que calcula o número ideal de classes com base na quantidade de observações:

$$k = 1 + 3.322 \cdot \log_{10} (n)$$

Com base na regra, foram identificadas 13 classes distintas de TDP, como apresentado abaixo:

Figura 2 – Tabela de frequência das CPUs.

Classe	Frequencia	Frequencia_Acumulada	Frequencia_Relativa
[1,31.7]	375	375	0.171
(31.7,62.4]	562	937	0.256
(62.4,93.1]	632	1569	0.288
(93.1,124]	269	1838	0.123
(124,154]	187	2025	0.085
(154,185]	68	2093	0.031
(185,216]	27	2120	0.012
(216,247]	27	2147	0.012
(247,277]	19	2166	0.009
(277,308]	22	2188	0.010
(308,339]	1	2189	0.000
(339,369]	1	2190	0.000
(369,400]	2	2192	0.001
Frequencia_Relativa_Acumulada			
	0.171		
	0.427		
	0.716		
	0.839		
	0.924		
	0.955		
	0.967		
	0.979		
	0.988		
	0.998		
	0.999		
	0.999		
	1.000		

Esse tipo de estrutura facilita a compreensão da distribuição dos dados e fornece suporte para análises subsequentes como histogramas, regressões e agrupamentos. Além disso, foram identificadas frequências relativas acumuladas, que permitem avaliar a proporção de valores abaixo de certos limiares técnicos. Por exemplo, 71.6% dos dispositivos possuem TDP inferior a 93,1W, valor que pode ser interpretado como limite superior típico para CPUs comuns.

Figura 3 – Tabela de frequência das GPUs.

Classe	Frequencia	Frequencia_Acumulada	Frequencia_Relativa
[2,76.8]	1330	1330	0.653
(76.8,152]	356	1686	0.175
(152,226]	161	1847	0.079
(226,301]	146	1993	0.072
(301,376]	21	2014	0.010
(376,451]	4	2018	0.002
(451,526]	6	2024	0.003
(526,601]	4	2028	0.002
(601,676]	4	2032	0.002
(676,750]	0	2032	0.000
(750,825]	3	2035	0.001
(825,900]	1	2036	0.000
Frequencia_Relativa_Acumulada			
			0.653
			0.828
			0.907
			0.979
			0.989
			0.991
			0.994
			0.996
			0.998
			0.998
			1.000
			1.000

Agora com a tabela de frequência para as GPUS os valores de TDP são um pouco maiores, sendo cerca de 90.7% abaixo de 226W de consumo. A categorização e tabulação revelam que os dados apresentam assimetria positiva, com maior concentração em faixas energéticas inferiores. Essa constatação fundamenta as hipóteses verificadas posteriormente em modelos preditivos e regressões.

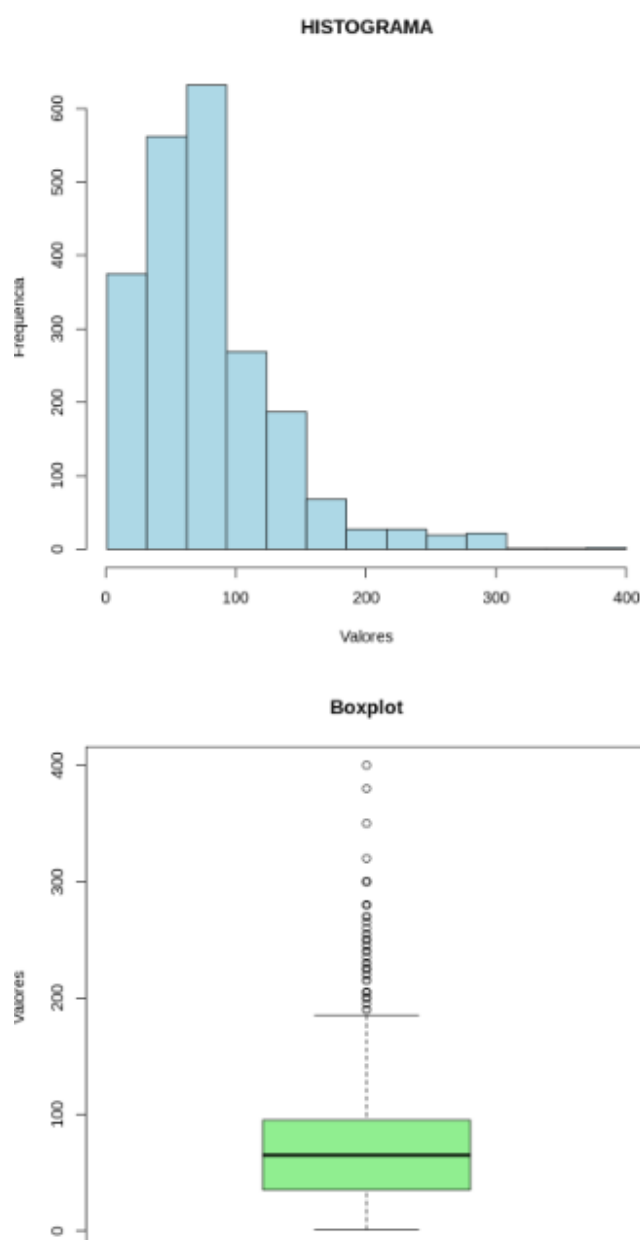
3.3 Histogramas e *Boxplots*

Com o objetivo de visualizar a distribuição das variáveis contínuas, especialmente o TDP (*Thermal Design Power*), foram elaborados histogramas e *boxplots* para as bases de CPU e GPU separadamente, além de uma visão geral da base completa. As visualizações permitem verificar padrões de dispersão, simetria e a presença de valores extremos, que nem sempre são detectáveis por estatísticas descritivas isoladas.

O histograma da CPU evidencia uma distribuição assimétrica à direita, com maior concentração de valores entre 10W e 150W. A frequência absoluta nas classes iniciais

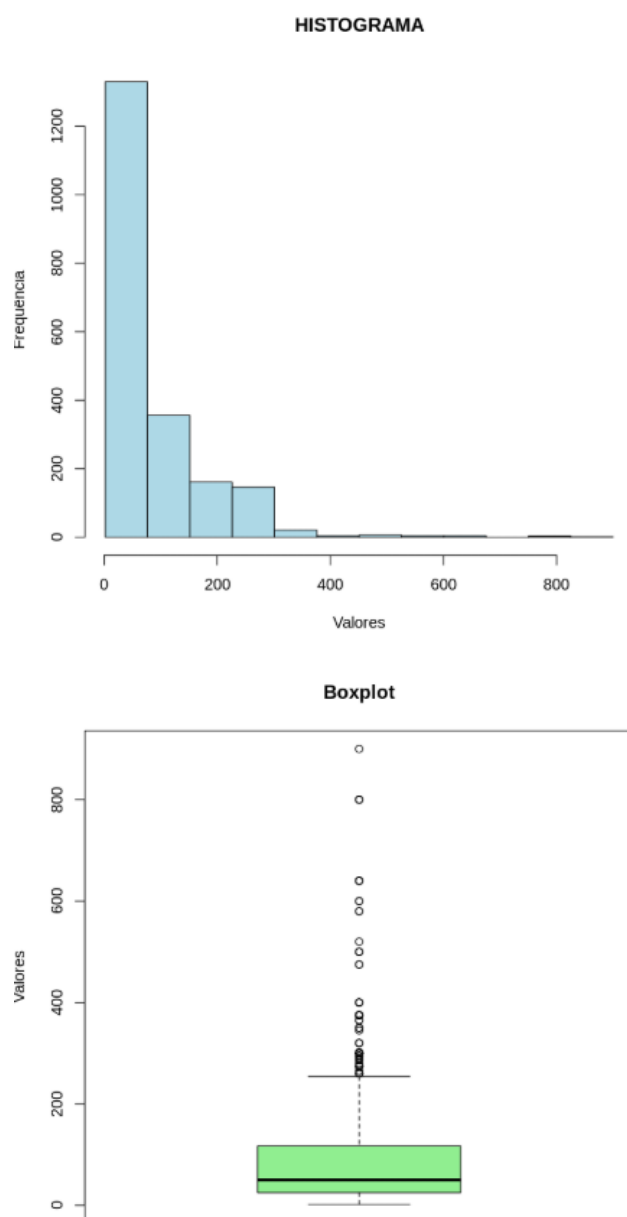
é significativamente maior, refletindo o comportamento padrão de dispositivos de consumo moderado. A queda abrupta nas classes superiores mostra que valores de TDP acima de 250W são exceções associadas a componentes de alto desempenho, geralmente GPUs.

Figura 4– Histograma e *Boxplot* da CPU



O *boxplot* revela uma mediana bem-posicionada próxima a 90W, além de uma faixa interquartil relativamente estreita. A presença de uma longa cauda superior com diversos outliers reforça a existência de componentes com consumo fora do padrão, especialmente CPUs de nova geração.

Figura 5– Histograma e *Boxplot* da GPU



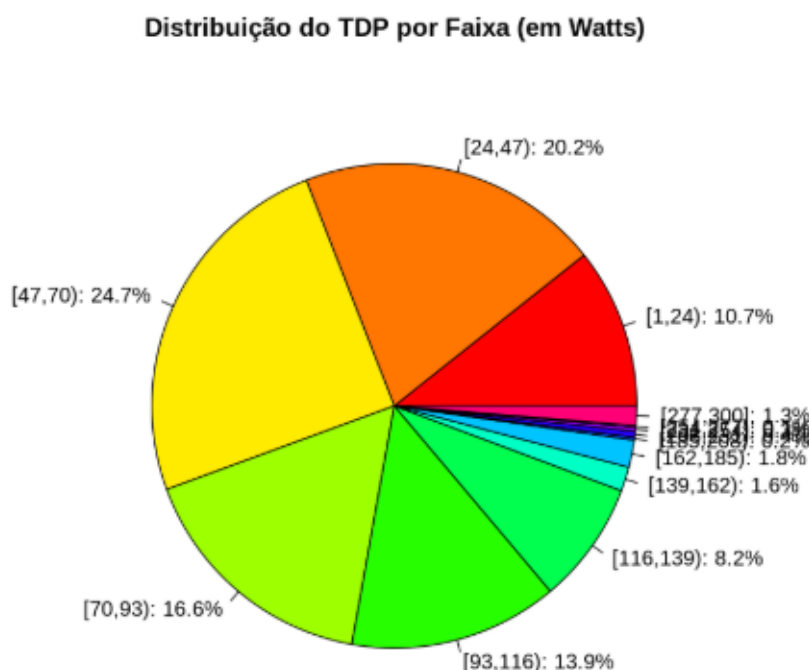
O histograma das GPUS tem um comportamento um pouco diferente, por mais que a faixa de consumo média esteja muito próximo as das CPUS, as anormalidades estão muito além da mediana e da média, devido a isso o gráfico se estende muito mais à esquerda.

O *boxplot* representa muito bem isso, com anormalidades que passam de 800 W, que assim como os processadores devem representar GPUS de altíssimo desempenho.

3.4 Gráficos de Pizza e Gráficos de Colunas

Além da visualização do consumo por histogramas e *boxplot* também é possível observar alguns valores em gráfico de pizza, para os gráficos foram realizados valores para CPUS e GPUS respectivamente:

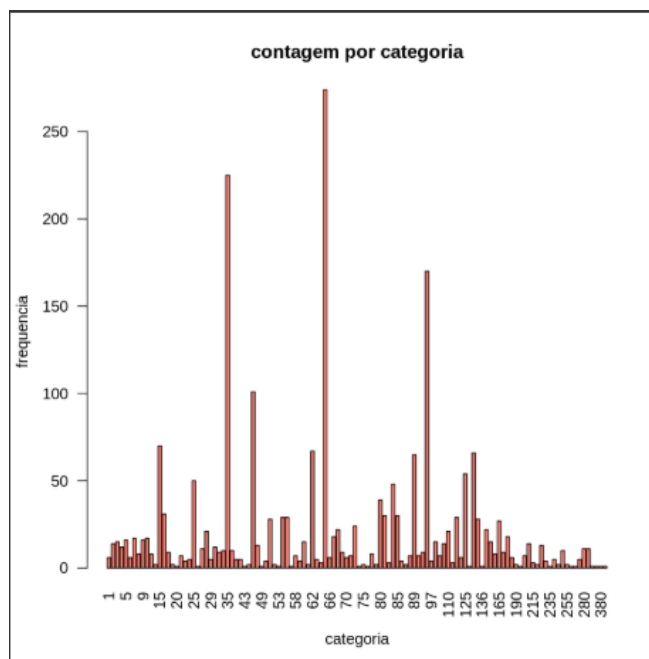
Figura 6– Gráfico de Pizza das CPUs



É realmente muito alto a quantidade de dados que estão entre 1 e 70, praticamente mais da metade dos valores desse gráfico.

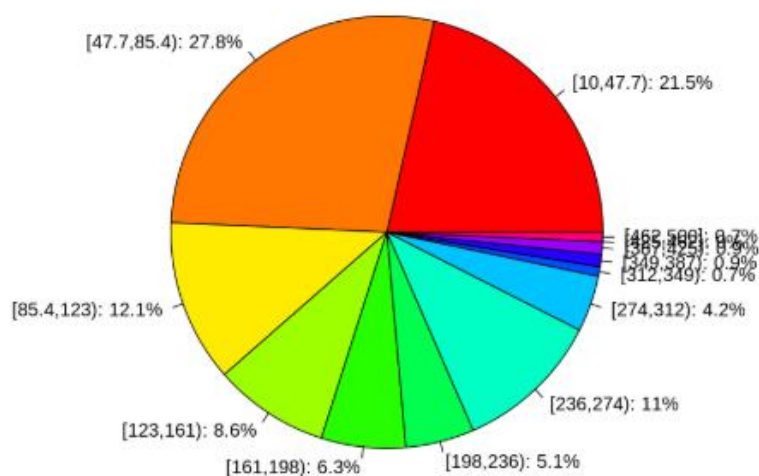
Logo abaixo também representa alguns valores onde é contado valores que são iguais na tabela.

Figura 7– Gráfico de Colunas das CPUs



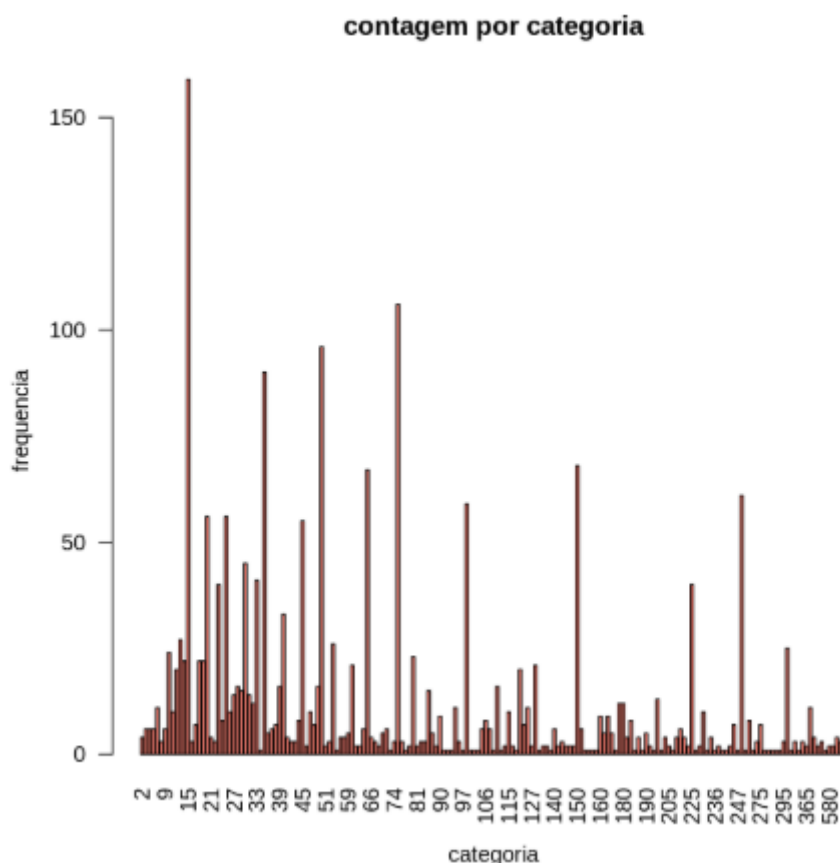
Há 3 grandes picos na tabela 65, 35, 95, que são números que provavelmente representam valores que são padrões na fabricação de processadores.

Figura 8– Gráfico de Pizza das GPUs



Aqui a faixa de valores que se encontra de 10 a 85.4 praticamente tem o valor da metade do *dataset* das GPUS.

Figura 9– Gráfico de Colunas das GPUs



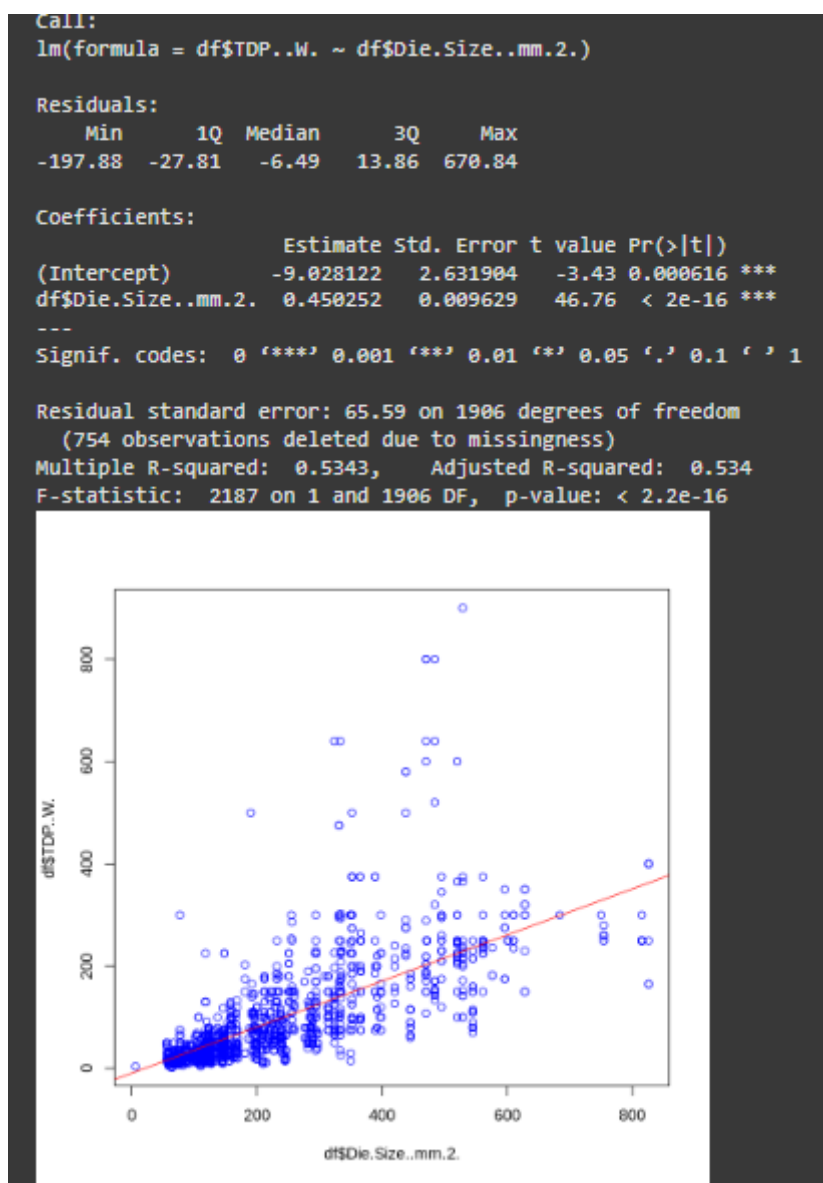
Assim como no gráfico anterior de barras, esse também possui alguns picos, porém a variedade de picos é maior do que a quantidade anterior, porém as maiores frequências também são menores.

3.5 Regressões:

3.5.1 Regressão Linear simples:

A Regressão linear simples foi utilizada apenas duas variáveis para traçar uma reta média entre os valores:

Figura 10– Gráfico de Regressão Linear das GPUs



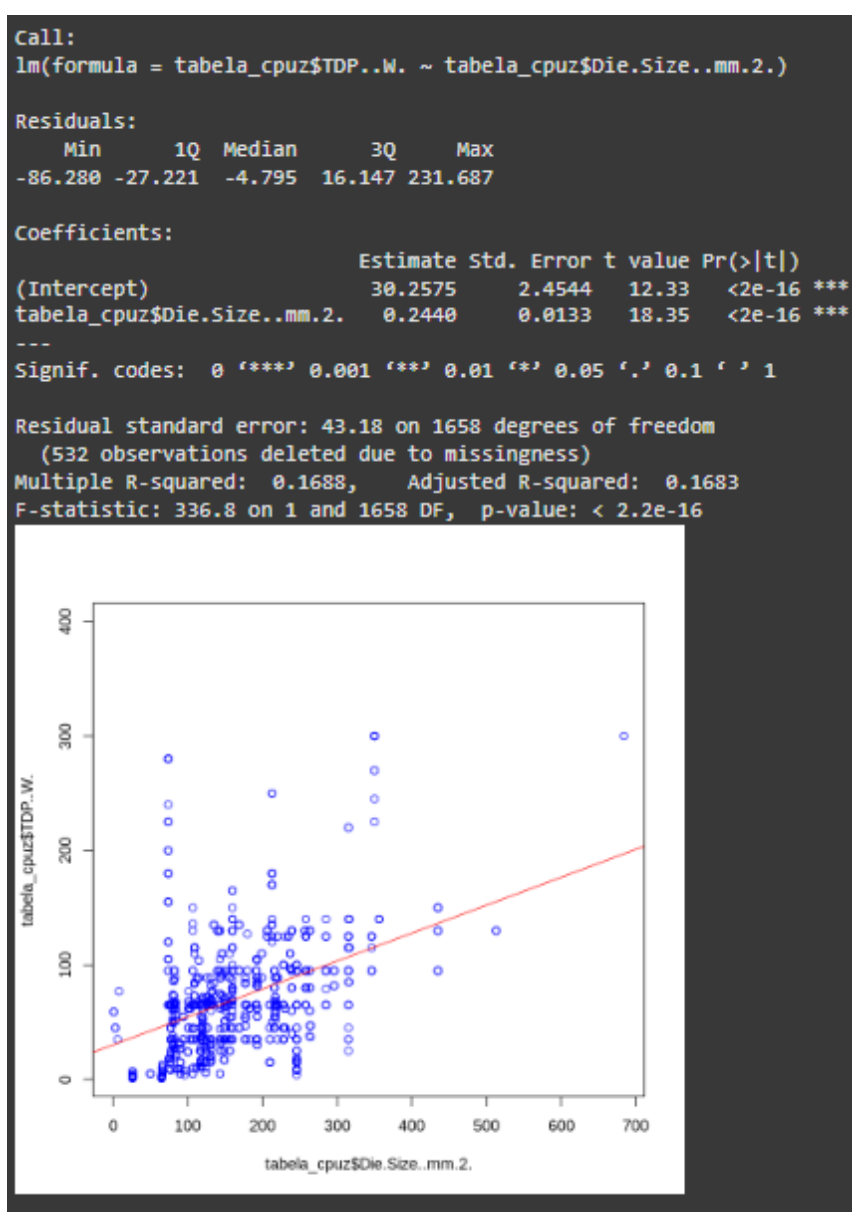
Como parâmetros foram utilizadas as variáveis TDP, que representa a quantidade de trabalho gasta em uma hora em energia elétrica (W), e o *Die.Size.mm.2* que representa a área do que essa GPU possui, ou seja, o tamanho que ela possui.

Com a visualização desses dados foi possível observar uma acurácia aproximada de 53.4%, onde é uma baixa precisão para utilizar como base, essa foi a

maior precisão dentro de todas as possíveis variáveis testadas na base de dados da GPU.

Agora passando para a análise no gráfico de regressão linear na base de dados da CPU, utilizando as mesmas variáveis os resultados foram bem diferentes. Assim como a regressão anterior foram utilizadas as melhores variáveis para essa comparação.

Figura 11– Gráfico de Regressão Linear das CPUs

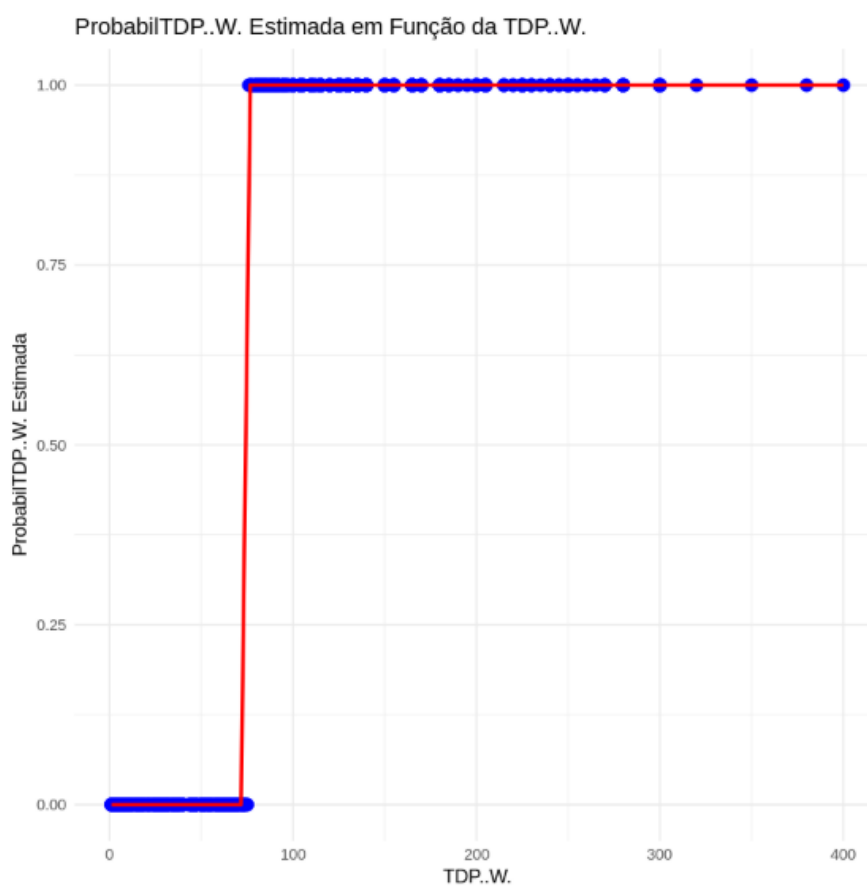


E o resultado foi pior que a regressão anterior, demonstrando apenas cerca de 16.83%, concluindo em ambas as regressões que para essa base de dados a regressão linear não terá tanta finalidade como os itens a seguir.

3.5.2 Regressão logística

Devido à grande falha nos testes de regressão logística, foi utilizado a regressão logística para fazer uma análise sobre esse TDP, conforme visualiza-se abaixo:

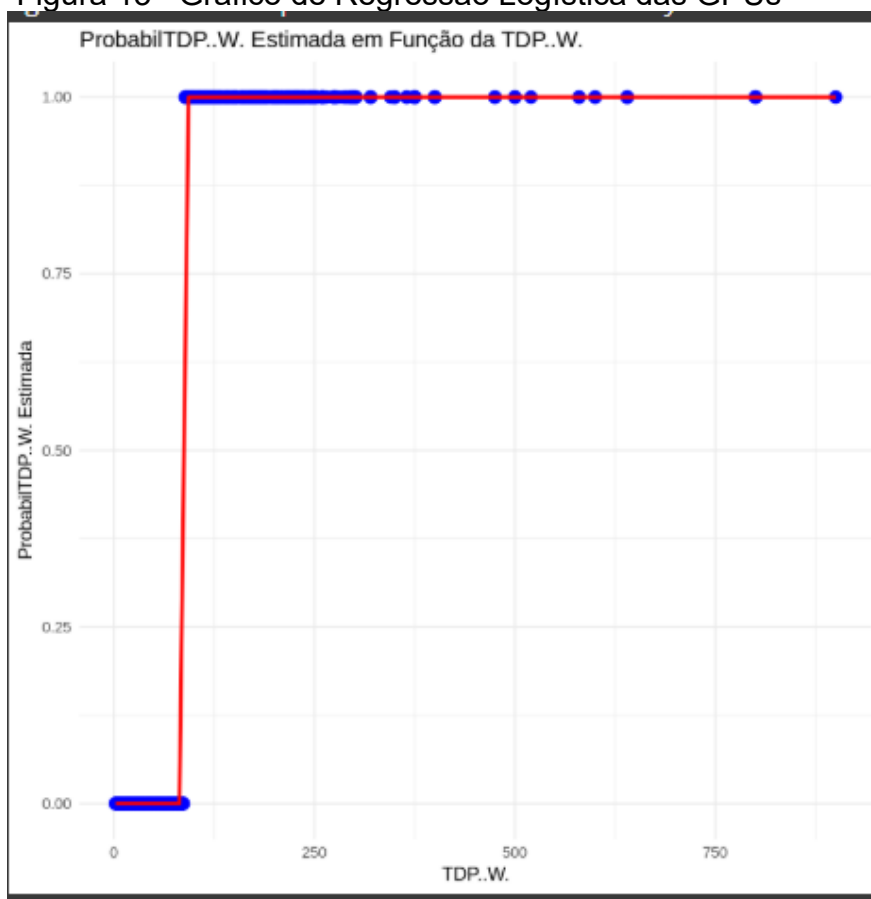
Figura 12– Gráfico de Regressão Logísticas das CPUs



Foi calculado a média de tdp dos processadores e utilizado como parâmetro para realizar essa regressão, conforme observado, é possível ver uma maior

quantidade encontrando-se abaixo dos 100 W, o que significa que há mais nessa faixa de processadores.

Figura 13– Gráfico de Regressão Logística das GPUs



Acima se observa essa regressão também para as GPUS, porém com essa mais amplitude nos dados, traz a média mais a trás, por isso o gráfico tem uma pequena diferença com o anterior.

4 ANÁLISE PREDITIVA E PRESCRITIVA

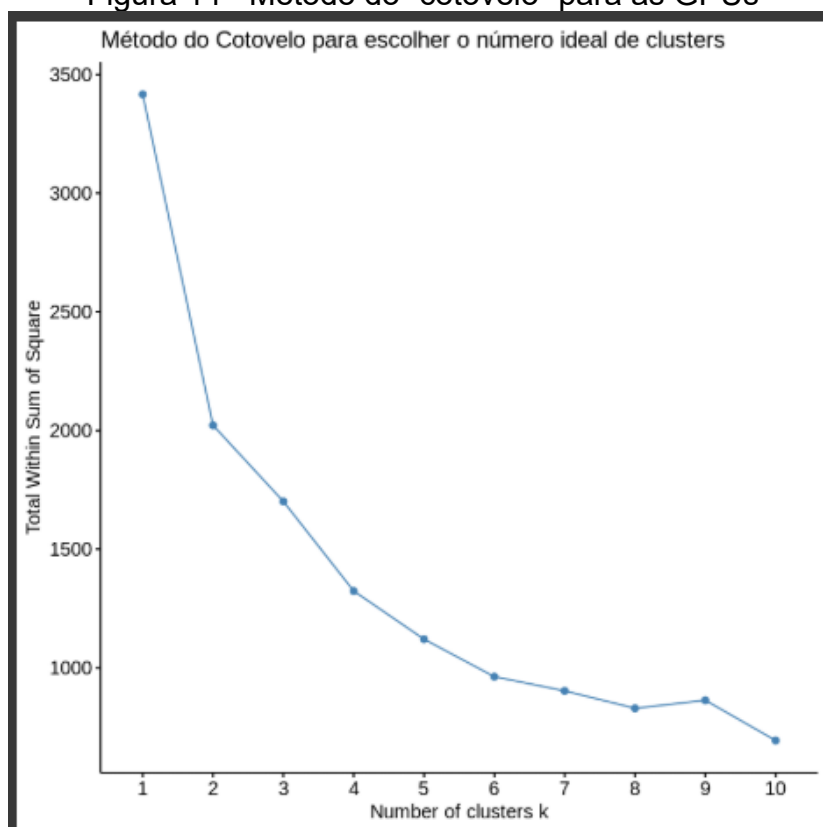
Para a análise preditiva foi utilizado *Machine Learning*, com alguns algoritmos de Aprendizado Supervisionado e Não supervisionado, sendo algoritmos como o PCA, *K-means*, *XGBOOST* e *Random Forest*, com os dois primeiros algoritmos foram

implementadas apenas para as GPUS, pois possuem todos os parâmetros na tabela, enquanto nos demais algoritmos foram implementadas para as duas tabelas.

4.2 K-means

Primeiro algoritmo implementado foi o *K-means* para identificar os grupos que tem mais importância dentro da base de dados.

Figura 14– Método do “cotovelo” para as GPUs



Primeiro foi realizado o teste do “Cotovelo”, que tem como finalidade descobrir a quantidade de *clusters* (grupos em inglês) que o método vai escolher para fazer as separações.

Foi testados 3 pontos, primeiro o ponto 2, que não foi muito efetivo, logo em seguida o k sendo como 8, onde o resultado foi muito bom, porém o melhor resultado foi quando foi usado 10 grupos.

Figura 15– Resultado do teste de *K-means*

K-means clustering with 10 clusters of sizes 17, 11, 34, 6, 80, 52, 10, 119, 51, 48

Cluster means:

	Process.Size..nm.	TDP..W.	Die.Size..mm.2.	Transistors..million.
1	-0.477905043	1.2181502208	2.49203443	1.8474724
2	-1.193788154	1.5892860327	1.46334192	2.1986473
3	2.826662533	0.0495665289	-0.02424485	-0.5632795
4	-1.356779398	2.4028384252	2.47738657	5.1478478
5	0.007819518	0.0034421985	-0.28707694	-0.3224086
6	-0.146186312	-1.0369422181	-0.57521856	-0.4056580
7	-0.400564099	1.7834186113	0.71153366	0.5447163
8	-0.052697259	-0.7316461200	-0.86247801	-0.6518892
9	-0.352909579	1.3439667251	0.96545577	0.6394233
10	-0.655388836	0.0008755418	0.55536419	0.3974216

	Freq..MHz.	FP16.GFLOPS	FP32.GFLOPS	FP64.GFLOPS
1	0.31623430	1.2297661	1.3245690	3.47981245
2	0.83993874	1.6892652	3.9065181	0.07857898
3	-0.96884766	-0.4425397	-0.5199476	-0.28707988
4	-0.30133328	5.2489052	1.8848017	4.41983738
5	0.63637417	-0.3886085	-0.1556827	-0.27764646
6	-1.85996202	-0.4863993	-0.7871961	-0.36276617
7	0.43228862	0.8554984	0.7865942	2.30211761
8	0.14990131	-0.5159178	-0.6748578	-0.34611067
9	0.91968649	0.6931565	0.9995591	-0.11007439
10	-0.06507398	0.3736390	0.3277807	-0.24841964

Aqui é possível realizar uma análise mais concreta, logo acima na primeira linha, mostra respectivamente a quantidade de elementos que cada grupo possui, e cada valor demonstrado na figura acima representa a centroide em relação à média, por exemplo, se o valor é 0 ele está na média, se ele é -1 está abaixo da média, se 1 está acima da média.

O primeiro grupo demonstra uma tecnologia um pouco melhor que a média, sendo possível observar pelo tamanho do chip (*Process.Size..mm.*) que representa o tamanho da tecnologia, quanto menor mais atual ele é, também é possível ver a quantidade de TDP, Transistores, FP16,FP32,FP64, com uma certa superioridade em relação à média geral.

Partindo para o segundo grupo visualiza-se uma tecnologia ainda mais recente que o anterior com um leve aumento no TDP, e uma diminuição do tamanho físico dele (*Die.Size..mm.2.*), e um aumento bem considerável na quantidade de transistores, também possuindo uma das frequências mais altas em relação as médias de todos os grupos.

Seguindo com o 3 grupo, ele provavelmente representa GPUS mais antigas devido a seus vários valores abaixo da média como transistores, Frequência, FP16, entre outros, além disso possui um grande tamanho do chip, o que quer dizer que não é uma tecnologia tão recente.

O próximo grupo é o 4º grupo, que representa as maiores médias de FP16 e FP64, com um consumo muito mais alto que outras placas, provavelmente são as placas que são as melhores em questão de desempenho mesmo que possua uma tecnologia não tão recente.

Existem alguns grupos que estão mais próximos da média geral, grupos como 5, 8 e 10, onde valores se aproximam mais de 0.

O Grupo 6 representa placas de vídeo de provavelmente baixo custo, devido a sua média geral se aproximando mais de valores negativos do que positivos.

Seguindo com o grupo 7, visualiza-se valores levemente melhores do que a média, principalmente na parte dos *GFLOPS*, representando um grupo de boas GPUS intermediárias.

Por fim, o grupo 9 é um equilíbrio entre desempenho e construção física, pois possui valores levemente acima da média na maioria dos aspectos.

Figura 16 – Alguns valores do resultado do *K-means*

```
Within cluster sum of squares by cluster:
[1] 40.16232 20.90803 86.76596 61.85573 74.46807 28.85974 29.49390
[8] 62.88004 123.04729 84.09288
(between_SS / total_SS = 82.1 %)
```

Analisando mais alguns aspectos, temos as somas dos quadrados de cada cluster, que representa valores que possuem mais ou menos variabilidade. Observando a figura é possível ver a alta variabilidade de alguns grupos como 5, 8, 9 e 10, logo abaixo podemos ver a porcentagem de variabilidade total que foi explicada pelo algoritmo, sendo uma taxa de 82.1% que é considerada uma boa taxa.

4.3 PCA

Além do *K-means*, também foram realizados na alguns testes com PCA, que também é um algoritmo de agrupamento.

Figura 17 – Teste de PCA com *K-means*

Importance of components:							
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
Standard deviation	2.1743	1.0606	0.9621	0.6963	0.50977	0.45644	0.39407
Proportion of Variance	0.5909	0.1406	0.1157	0.0606	0.03248	0.02604	0.01941
Cumulative Proportion	0.5909	0.7315	0.8472	0.9079	0.94033	0.96637	0.98578
	PC8						
Standard deviation	0.33724						
Proportion of Variance	0.01422						
Cumulative Proportion	1.00000						

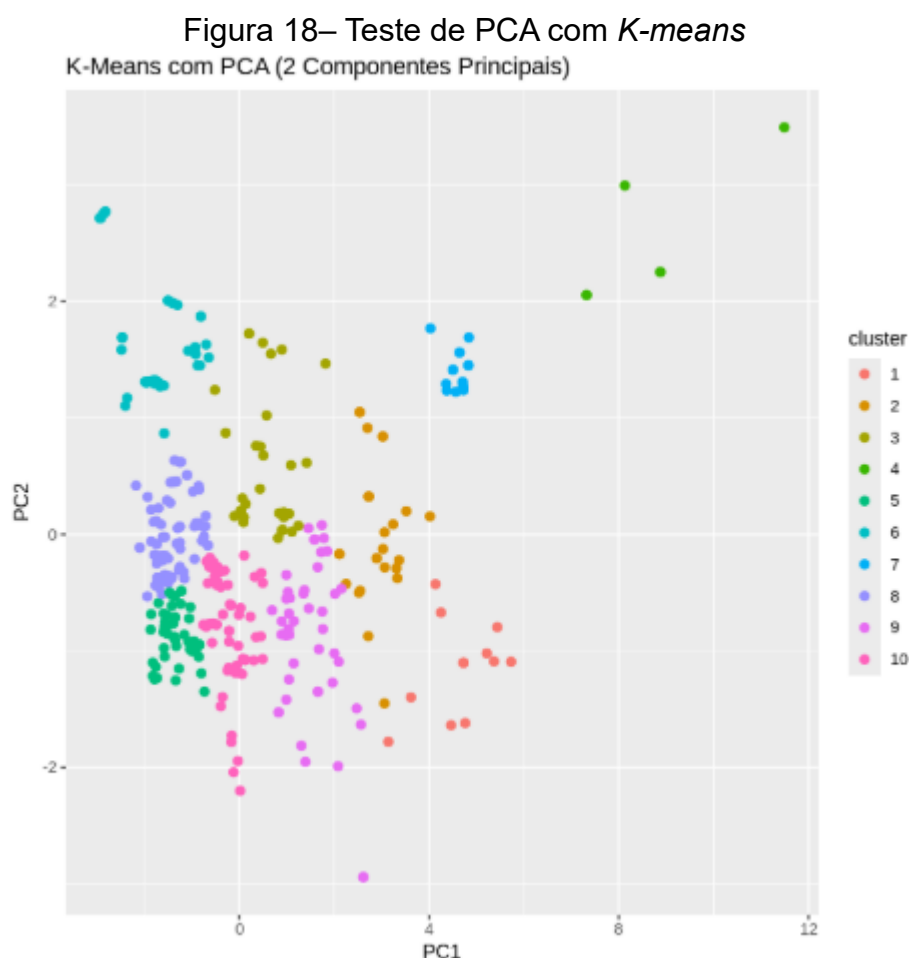
Aqui se observa o resultado dos testes, onde na primeira linha observa-se o desvio padrão do componente principal, e logo abaixo as duas últimas linhas representam a porcentagem de importância dessas variâncias de cada PC.

O PC1, PC2 e PC3, já explicam grande parte da tabela sendo cerca de 84%, onde com esses dados já seriam o suficiente para realizar uma boa análise reduzindo os ruídos com os demais.

4.4 PCA com *K-means*

Após a análise dos dois conjuntos de ferramentas de *Machine Learning* com aprendizado não supervisionado, foi realizado uma junção de ambos os algoritmos para a criação de uma análise mais visual conforme visualiza-se abaixo.

Para a análise foram utilizado o PC1 e PC2 que são os dois componentes principais mais importantes da tabela, com isso observa-se o comportamento de alguns grupos demonstrando valores que estão muito acima da média dos dois PCs, que é o caso dos grupos 4 e 7, o que assegura mais ainda as deduções vista no *k-means*, enquanto algumas placas que se encontram nos grupos 5,8 e 10, aproxima-se muito da média onde a análise se mantém ali.



4.5 XGBOOST

Agora entrando no mundo dos algoritmos supervisionados, *XGBOOST* foi utilizado como um importante método de *Machine Learning* nessas tabelas.

Para os testes de CPU e GPU foram apresentadas duas respostas ao teste, que são os RMSE que mede o erro médio absoluto entre a previsão e o valor real, aonde os valores vão de 0 a 5 quanto maior o valor maior a taxa de erro, enquanto o R^2 mede a precisão que o algoritmo desempenhou.

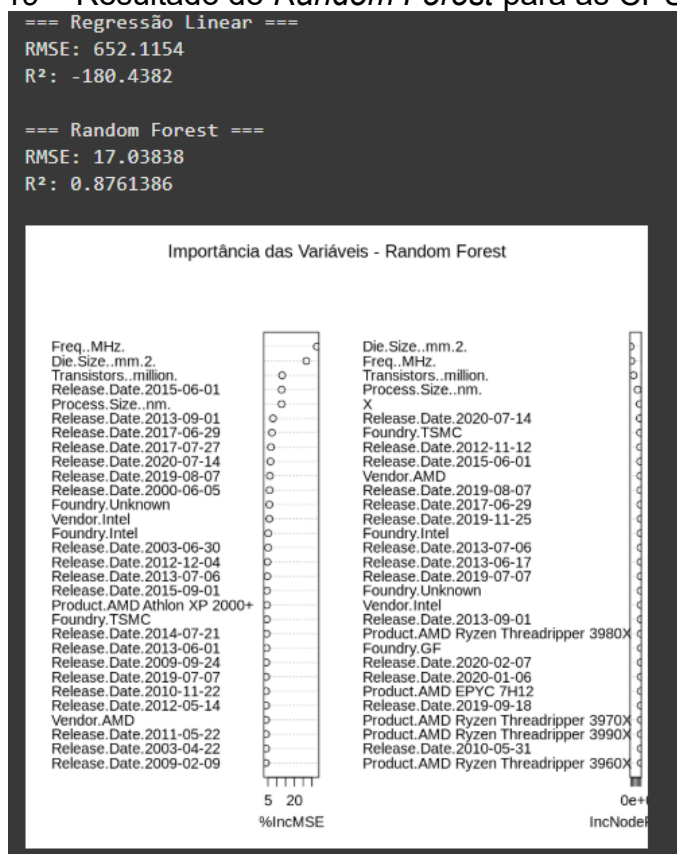
Para a CPU o algoritmo demonstrou um RMSE de 0,7356949, que indica um baixo erro na implementação, enquanto para R^2 demonstrou 0,9997691 que é uma precisão altíssima. Também para a GPU foram realizados os mesmos testes, RMSE demonstrou um valor de 1.355777 onde também indica uma baixa taxa de erro,

enquanto o R^2 demonstrou 0.999774 que é uma taxa muito alta e como na CPU chega muito próximo a perfeição.

4.6 Random Forest

Aqui temos um algoritmo que vai contribuir bastante para descobrir qual é a melhor GPU e CPU do *dataset*, o *Random Forest* irá ajudar a descobrir a importância das variáveis baseada em uma variável alvo.

Figura 19 – Resultado do *Random Forest* para as CPUs



Começando com a CPU primeiro foi realizado um teste para regressão linear e como visto nos gráficos anteriormente foi um teste com resultado horrível para essa base de dados, então é algo a ser descartado.

Logo em seguida temos o desempenho do *Random Forest* que traz um RMSE muito bom onde é possível visualizar alguns parâmetros nesse contexto para o RMSE:

Figura 20 – RMSE referencial no modelo do *Random Forest*

Faixa de RMSE	Significado no contexto técnico
RMSE < 10	Modelo extremamente preciso
RMSE entre 10–100	Modelo muito bom
RMSE entre 100–300	Modelo aceitável (bom ponto de partida)
RMSE entre 300–1000	Modelo com erros visíveis (pode melhorar)
RMSE > 1000	Modelo ruim (provavelmente sub ou overfitting)

Observando alguns valores é possível identificar um modelo muito bom para ser observado para esse teste, logo após isso pode-se ver o R^2 que mostra cerca de 87,6% de precisão demonstrando um alto percentual.

Com isso podemos observar o modelo em si, esse modelo organiza as variáveis em posições do mais importante ao menos relevante de acordo com uma variável alvo, nesse caso a variável é TDP, ou seja, quando maior o TDP as variáveis que mais terão influência serão frequência e o tamanho físico do processador. Isso já será o suficiente para realizar um ranking para descobrir qual é o melhor processador baseado no TDP.

Para a construção desse *ranking* foi retirado através do *Random Forest* as variáveis de maior impacto no TDP, e com isso foi realizado uma média ponderada considerando um peso em porcentagem, para o próprio TDP como é uma variável mais importante foi definido o peso dela como 40%, e o restando dos 60% foram divididas nas demais variáveis, que foram consideradas como: quantidade de transistor em 30%, tamanho real do processador em 20% e 10% para o tamanho do chip, nessa tabela demonstrou alguns valores, sendo todas as variáveis daquela tupla na tabela e o Score_Ponderado, que é uma porcentagem onde ele atingiu sobre o peso dos valores, onde 1 seria o processador perfeito nesse mundo e 0 seria o pior processador possível a ser produzido.

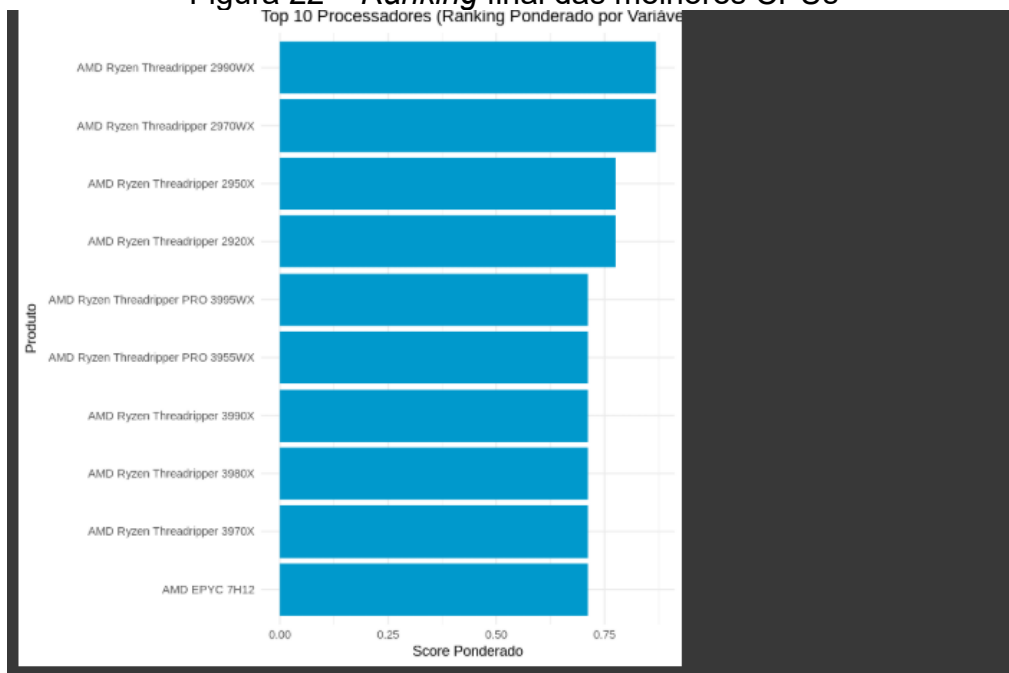
Figura 21 – Ranking final para as CPUs

Rank	Product	Score_Ponderado	TDP..W.	
<int>	<fctr>	<num>	<int>	
1:	1 AMD Ryzen Threadripper 2970WX	0.8681411	250	
2:	2 AMD Ryzen Threadripper 2990WX	0.8681411	250	
3:	3 AMD Ryzen Threadripper 2920X	0.7744956	180	
4:	4 AMD Ryzen Threadripper 2950X	0.7744956	180	
5:	5 AMD Ryzen Threadripper PRO 3955WX	0.7107783	280	

1539:	1539 AMD Opteron 840 EE	0.2125554	30	
1540:	1540 Intel Pentium III 933	0.2117590	27	
1541:	1541 Intel Pentium 4 1.4	0.2090687	55	
1542:	1542 Intel Pentium 4 1.4	0.2090687	55	
1543:	1543 Intel Pentium 4 1.3	0.2050553	52	
Transistors..million.	Die.Size..mm.2.	Process.Size..nm.	Freq..MHz.	Vendor
<int>	<int>	<int>	<int>	<fctr>
1:	19200	213	12	3000 AMD
2:	19200	213	12	3000 AMD
3:	19200	213	12	3500 AMD
4:	19200	213	12	3500 AMD
5:	3800	74	7	3900 AMD

1539:	106	193	130	1400 AMD
1540:	44	80	180	933 Intel
1541:	42	217	180	1400 Intel
1542:	42	217	180	1400 Intel
1543:	42	217	180	1300 Intel

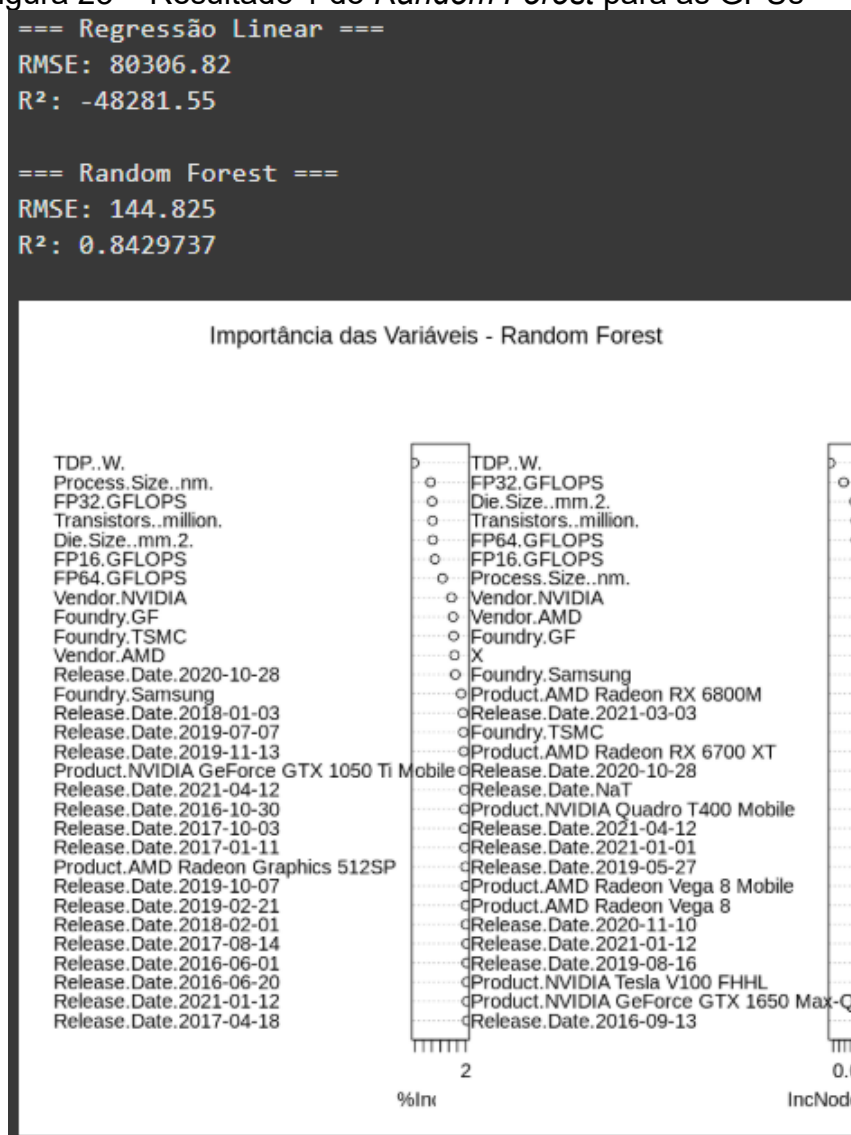
Figura 22 – Ranking final das melhores CPUs



E com isso gerou esse ranking, que demonstrou que *AMD Ryzen Threadripper 2970WX* é o melhor processador dessa lista, porém *AMD Ryzen Threadripper 2990WX* tem a mesma pontuação então ambos os processadores nesse caso podem ser considerados como os melhores.

Além da análise na CPU foram realizados os testes para GPU também onde foi realizado o teste do *Random Forest* duas vezes, considerando duas variáveis como alvo, sendo elas TDP e Freq.

Figura 23 – Resultado 1 do *Random Forest* para as GPUs



Nesse teste acima foi considerado a variável frequência, com um RMSE muito bom e o alto percentual do R^2 , devido a grande quantidade de variáveis a média ponderada nesse caso vai funcionar diferente:

Figura 24 –Peso das variáveis no primeiro teste das GPUs

Variável	Peso Proposto
Freq..MHz.	0.3
FP32.GFLOPS	0.25
FP64.GFLOPS	0.2
Transistors..million	0.1
Die.Size..mm.2.	0.10 (inverso)
Process.Size..nm.	0.05 (inverso)

Esse é o peso das variáveis, alguns valores foram definidos como negativos pois quando menor o tamanho melhor.

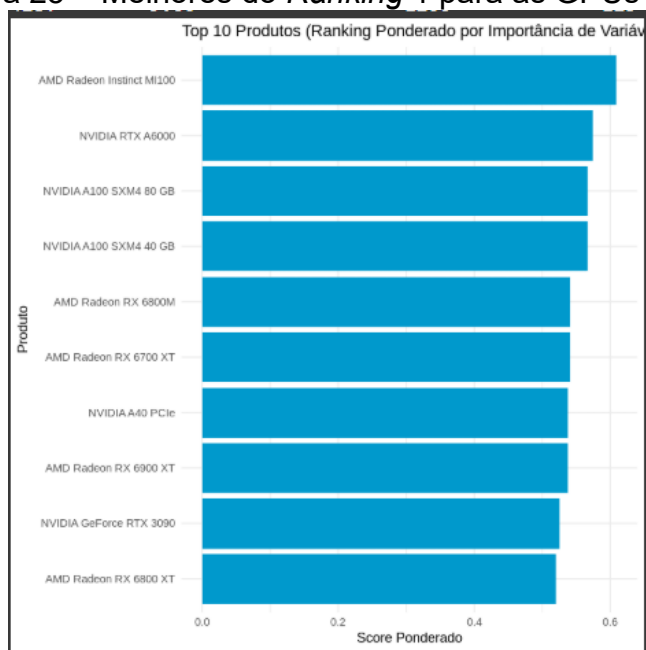
Figura 25 – *Ranking* 1 para as GPUs

Rank	Product	Score_Ponderado	Freq..MHz.	FP32.GFLOPS
<int>	<fctr>	<num>	<int>	<num>
1: 1	AMD Radeon Instinct MI100	0.60911564	1000	23070.0
2: 2	NVIDIA RTX A6000	0.57414136	1455	40000.0
3: 3	NVIDIA A100 SXM4 80 GB	0.56679787	1095	19490.0
4: 4	NVIDIA A100 SXM4 40 GB	0.56679787	1095	19490.0
5: 5	AMD Radeon RX 6700 XT	0.54159335	2321	13210.0

424: 424	AMD Radeon R5 Mobile Graphics	0.10039127	200	553.0
425: 425	AMD Radeon R5 Mobile Graphics	0.09451951	200	325.2
426: 426	AMD Radeon R4 Mobile Graphics	0.09397716	200	251.5
427: 427	AMD Radeon R3 Mobile Graphics	0.09336052	200	167.7
428: 428	AMD Radeon R2 Mobile Graphics	0.09325679	200	153.6
FP64.GFLOPS	Transistors..million.	Die.Size..mm.2.	Process.Size..nm.	Vendor
<num>	<int>	<int>	<int>	<fctr>
1: 11540.00	50000	750	7	AMD
2: 1250.00	28300	628	8	NVIDIA
3: 9746.00	54200	826	7	NVIDIA
4: 9746.00	54200	826	7	NVIDIA
5: 825.90	17200	335	7	AMD

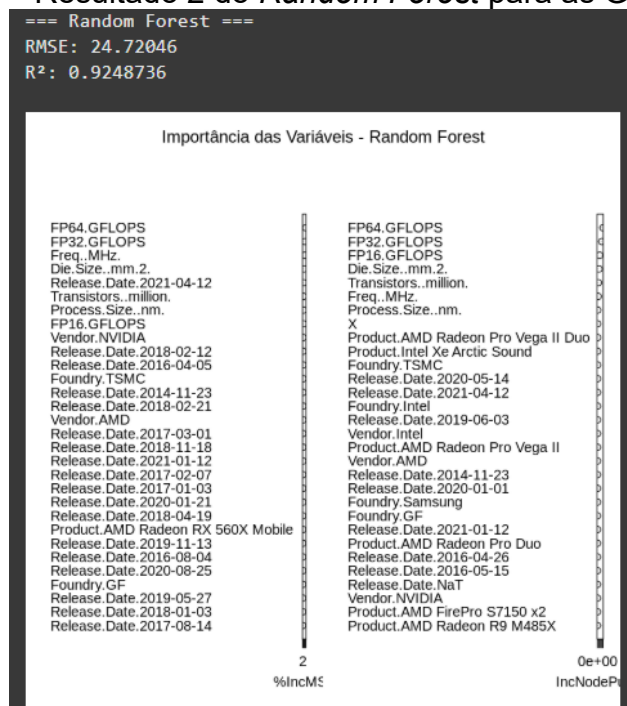
424: 276.50	1200	125	28	AMD
425: 20.33	1200	125	28	AMD
426: 15.72	1200	125	28	AMD
427: 10.48	1200	125	28	AMD
428: 9.60	1200	125	28	AMD

Figura 25 – Melhores do *Ranking 1* para as GPUs



Esses foram os resultados, o percentual do maior score_ponderado, não foi tão grande quanto o valor das CPUs, devido a isso foi trocado a variável para TDP, para observar se o teste seria diferente:

Figura 26 – Resultado 2 do *Random Forest* para as GPUs



Com isso pode-se observar um resultado diferente, porém utilizando outros pesos já que a variável base não foi igual:

Figura 27 –Peso das variáveis no primeiro teste das GPUs

Variável	Peso Proposto
TDP..W.	0.2
FP32.GFLOPS	0.1
Freq..MHz.	0.05
Die.Size..mm.2.	0.10 (inverso)
Transistors..million.	0.1
Process.Size..nm.	0.10 (inverso)
FP64.GFLOPS	0.25

Então com esses pesos o *ranking* foi gerado, conforme é possível visualizar abaixo:

Figura 28 –*Ranking* 2 para as GPUs

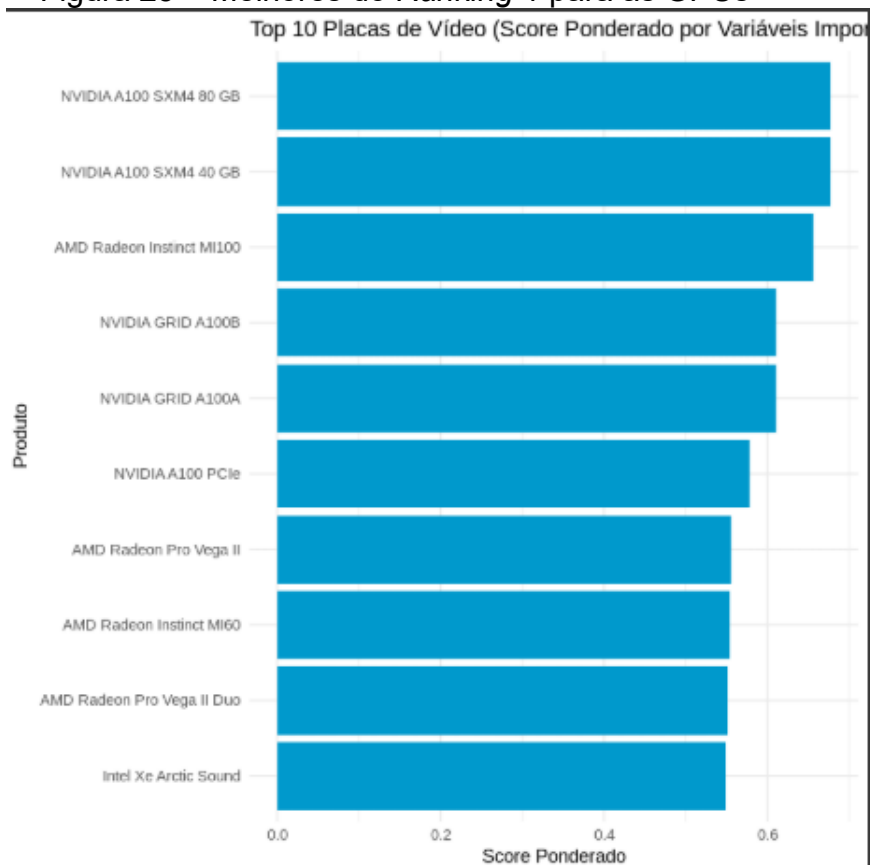
Rank	Product	Score_Ponderado	FP64.GFLOPS
<int>	<fctr>	<num>	<num>
1: 1	NVIDIA A100 SXM4 80 GB	0.67728968	9746.00
2: 2	NVIDIA A100 SXM4 40 GB	0.67728968	9746.00
3: 3	AMD Radeon Instinct MI100	0.65610375	11540.00
4: 4	NVIDIA GRID A100A	0.61009830	6947.00
5: 5	NVIDIA GRID A100B	0.61009830	6947.00

424: 424	AMD Radeon R5 Mobile Graphics	0.10194897	276.50
425: 425	AMD Radeon R5 Mobile Graphics	0.09693475	20.33
426: 426	AMD Radeon R4 Mobile Graphics	0.09666984	15.72
427: 427	AMD Radeon R3 Mobile Graphics	0.09636866	10.48
428: 428	AMD Radeon R2 Mobile Graphics	0.09631802	9.60
	FP32.GFLOPS Freq..MHz. Transistors..million. TDP..W. Die.Size..mm.2.		
	<num> <int> <int> <int> <int>		
1: 1	19490.0 1095 54200 400 826		
2: 2	19490.0 1095 54200 400 826		
3: 3	23070.0 1000 50000 300 750		
4: 4	13890.0 900 54200 400 826		
5: 5	13890.0 900 54200 400 826		

424: 424	553.0 200 1200 15 125		
425: 425	325.2 200 1200 15 125		
426: 426	251.5 200 1200 15 125		
427: 427	167.7 200 1200 15 125		
428: 428	153.6 200 1200 15 125		
	Process.Size..nm. Vendor		
	<int> <fctr>		
1: 1	7 NVIDIA		
2: 2	7 NVIDIA		
3: 3	7 AMD		
4: 4	7 NVIDIA		
5: 5	7 NVIDIA		

424: 424	28 AMD		
425: 425	28 AMD		
426: 426	28 AMD		
427: 427	28 AMD		
428: 428	28 AMD		

Figura 25 – Melhores do *Ranking 1* para as GPUs



O Score ponderado do maior valor teve um aumento de 7% em relação ao teste anterior, porém os valores também foram trocados o que representa que a variável alvo pode fazer muita diferença.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após feita a análise de vários gráficos e informações que eram apenas dados, foi possível transpor isso para um conteúdo de fato, objetivo principal do artigo era descobrir qual era o melhor CPU e qual era a melhor GPU, com a análise principal do algoritmo *Random Forest* e várias outras métricas, foi constatado que o melhor CPU com a variável alvo TDP, é o *AMD Ryzen Threadripper 2970WX* e *AMD Ryzen Threadripper 2990WX* pois ambos desempenharam com o mesmo resultado nos

testes, e para as GPUS com a mesma variável alvo, a GPU que desempenhou melhor foi a NVIDIA A100 SXM4.

6 REFERÊNCIAS

ALPAYDIN, Ethem. *Introduction to Machine Learning*. 4. ed. Cambridge: MIT Press, 2020.

GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.org/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

JAIN, Anil K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, v. 31, n. 8, p. 651–666, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>. Acesso em: 20 jun. 2025.

JAMES, Gareth et al. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. 2. ed. New York: Springer, 2021. Disponível em: <https://www.statlearning.com>. Acesso em: 20 jun. 2025.

JOLLIFFE, Ian T. *Principal Component Analysis*. 2. ed. New York: Springer, 2002.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, v. 1, p. 281–297, 1967.

MARR, Bernard. *Big Data: Using SMART Big Data, Analytics and Metrics to Make Better Decisions and Improve Performance*. Chichester: Wiley, 2016.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

PROVOST, Foster; FAWCETT, Tom. *Data Science for Business: What You Need to Know About Data Mining and Data-Analytic Thinking*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2013.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SEBESTA, Robert W. *Conceitos de Linguagens de Programação*. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

SHMUELI, Galit; KOPPIUS, Otto R. Predictive Analytics in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 35, n. 3, p. 553–572, 2011. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/23042796>. Acesso em: 20 jun. 2025.

TANENBAUM, Andrew S.; BOS, Herbert. *Modern Operating Systems*. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2015.

TRIOLA, Mario F. *Introdução à Estatística*. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

WICKHAM, Hadley. *R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. Disponível em: <https://r4ds.had.co.nz>. Acesso em: 20 jun. 2025.

WICKHAM, Hadley; GROLEMUND, Garrett. *R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data*. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017. Disponível em: <https://r4ds.had.co.nz>. Acesso em: 20 jun. 2025.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUÇÃO EM LINHAS PRODUTIVAS DE UMA INDÚSTRIA FARMACÊUTICA

Wagner de Lima Santos e Renato Kazuo Miyamoto*

RESUMO

Este artigo aborda a análise da eficiência energética em motores elétricos utilizados em uma indústria farmacêutica, focando no sistema de bombeamento e refrigeração de água. A metodologia empregada inclui a coleta de dados experimentais, como tensão, corrente e fator de potência, por meio de um analisador de energia, para avaliar o desempenho do motor em operação e propor melhorias. Com base nos resultados obtidos, é analisada a viabilidade de substituição do motor por um modelo mais eficiente, alinhado às regulamentações vigentes e visando a redução de custos e o aumento da eficiência operacional.

Palavras-chave: Eficiência energética, Motores elétricos, Indústria farmacêutica.

Energy Efficiency Analysis in Electric Motors in a Pharmaceutical Industry

ABSTRACT

This article addresses the analysis of energy efficiency in electric motors used in a pharmaceutical industry, focusing on the water pumping and refrigeration system. The methodology employed includes the collection of experimental data, such as voltage, current, and power factor, using an energy analyzer to evaluate the performance of the motor in operation and propose improvements. Based on the results obtained, the feasibility of replacing the motor with a more efficient model, aligned with current regulations and aimed at reducing costs and increasing operational efficiency, is analyzed.

Key words: Energy efficiency, Electric motors, Pharmaceutical industry.

* Autor correspondente (e-mail): renato.miyamoto@sistemapiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do ONS-operador nacional do sistema elétrico (2023), cerca de 58% da geração elétrica no Brasil é proveniente da energia hidráulica. Desta forma, os aspectos climáticos relacionados ao período de seca, podem contribuir para que as bandeiras tarifárias subam devido ao aumento do custo de geração de energia. De acordo com fabricante nacional de motores elétricos a WEG⁴ (2023), o setor industrial brasileiro consome cerca de 45% da energia elétrica do país e 70% do consumo é utilizado para o acionamento de motores elétricos.

Segundo dados do PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (2023), os fabricantes de motores elétricos têm que atender aos requisitos mínimos em eficiência energética alinhado com o decreto presidencial de 8 de dezembro de 1993. O objetivo principal consiste em identificar os produtos que apresentem melhores níveis de eficiência energética em uma dada categoria de equipamentos.

Segundo estimativa levantado em 2019 pela EPE – empresa de pesquisa energética o plano decenal de expansão de energia é esperado até o ano 2029 uma redução no consumo de energia elétrica no setor industrial de 6%. Neste cenário, uma das características principais em uma indústria farmacêutica, consiste na utilização de equipamentos para o condicionamento de ar, nestes equipamentos, os motores de indução são aplicados em grande escala.

O setor de utilidades em uma indústria farmacêutica é responsável pelas maiores cargas indutivas em potência e em quantidade da planta, logo, existe uma grande abertura para realização de melhorias visando a utilização inteligente da energia empregada para o processo. A vida útil dos motores de indução, de acordo com a ABRAMAM - Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (2011) é de 17 anos. Paradas inesperadas em qualquer processo produtivo, gera gastos desnecessários com manutenção e muitas vezes com a matéria prima que se perdeu durante a parada.

Um estudo do Centro Técnico Científico da PUC-RIO avaliado por Calli afirma que “ainda que, à primeira vista, o preço mais barato seja mais atrativo, os motores

obsoletos possuem eficiência comprometida, vida útil curtíssima e consumo energético excessivo, o que acaba encarecendo o motor reformado”.

O estudo também estima que a cada recondicionamento de um mesmo motor ocorra a perda de 2% do seu rendimento e que o total de motores reconicionados seja responsável por 2,8% da emissão de GEE - Gases de Efeito Estufa liberados na atmosfera só no Brasil. O objetivo do estudo, é realizar uma análise de viabilidade de medidas de eficiência energética, analisando os motores elétricos, métodos de controle para um melhor aproveitamento da energia elétrica, os conceitos fundamentais para a aplicação dos métodos e uma base de estudo com levantamento de valores para realizar a substituição de motores já em operação.

Assim, a principal motivação deste trabalho consiste na análise da eficiência energética em motores elétricos de uma indústria farmacêutica. Para isto, uma verificação detalhada sobre os métodos de acionamento, taxa de carga e dimensional dos condutores será realizada e aplicada nesta indústria do setor farmacêutico localizada em Cambé – Paraná, que se caracteriza por ser líder global no mercado de biossimilares e medicamentos genéricos, com ampla estrutura conta com equipamentos que garantem a estabilidade da produção de medicamentos.

O processo que levará o foco desse trabalho será o de refrigeração e bombeamento de água, aplicadas para diversas etapas do processo produtivo. Nesse contexto, o uso dos motores elétricos de indução torna-se essencial. Assim, são coletados os dados de tensão, corrente, potência, fator de potência, taxas de distorção harmônicas para o desenvolvimento para proposta de melhoria de eficiência energética nessas máquinas. A seguir, serão descritos os aspectos relacionados ao estado da arte, utilizados nessa pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Nos últimos anos, programas relacionados com a eficiência energética têm crescido e ganhado força em território nacional. A busca por desenvolvimento preservando a sustentabilidade se torna um desafio para as indústrias visto que a

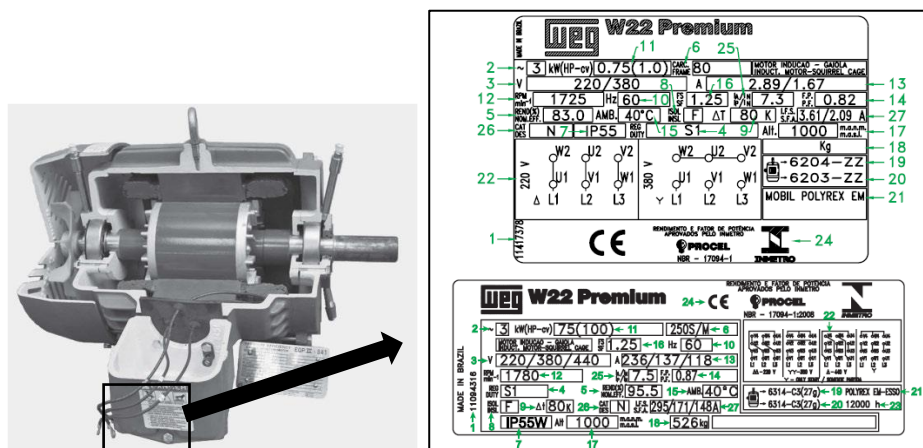
capacidade de produção somente aumenta. Com essa crescente demanda, a busca por redução de preços dos medicamentos genéricos se torna um desafio tendo em vista um mercado amplo e diversificado.

Dentro de uma indústria farmacêutica o departamento de engenharia é um dos departamentos que mais necessitam de investimentos para o funcionamento, seja na aquisição de novos equipamentos ou na manutenção do maquinário existente (preventivas), e as manutenções que surgem durante o processo produtivo as chamadas manutenções corretivas.

Segundo Chapman (2013, p. 01)” [...] uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter tanto a energia mecânica em energia elétrica como a energia elétrica em energia mecânica.” Muitas vezes a falta de manutenção adequada somada ao tempo de utilização, ano de fabricação, resultam em perdas elétricas. O efeito Joule é o exemplo mais palpável que temos quando o assunto é referente a rendimento dos motores. O aquecimento da carcaça do motor, nada mais é do que a conversão de energia elétrica em energia térmica.

O estudo foi direcionado a motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo. Esse equipamento é o mais comum de ser utilizado em indústrias devido a sua facilidade de ligação, custo, e a manutenção ser relativamente fácil em comparação com outros tipos de motores além de ser versátil, podendo ser utilizado para diversas aplicações na indústria. Na Figura 1(a), observa-se a vista em corte longitudinal de um motor de indução de 460v 7,5 HP com rotor gaiola de esquilo.

Figura 1 – Motor de indução: (a) Visão em corte motor de indução; (b) placa de identificação.

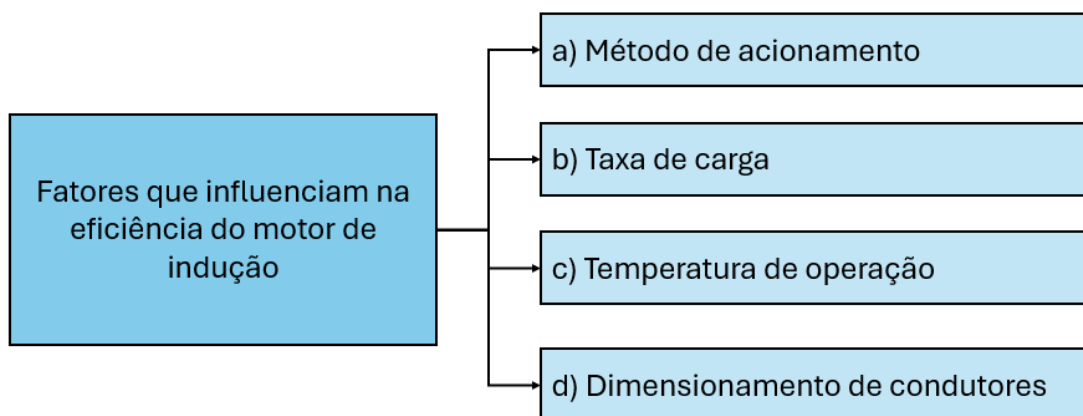


Fonte: Umans, Stephen D. (2014 p.199).

Na Figura 1(b), observa-se uma placa de identificação de um motor de indução trifásico da linha W22 premium da WEG. O motor de código [1] é um equipamento trifásico [2] projetado para operar em uma tensão nominal de [3] volts. Seu regime de serviço é [4], garantindo um rendimento de [5] %. O modelo da carcaça é [6], com grau de proteção [7], adequado para ambientes com classe de isolamento [8], que suporta uma temperatura de [9] °C. O motor funciona com uma frequência de [10] Hz e tem uma potência nominal de [11] kW, com uma rotação de [12] rpm. A corrente nominal de operação é de [13] A, com um fator de potência de [14]. A temperatura ambiente para operação segura é de [15] °C, e o motor possui um fator de serviço de [16]. Ele pode ser instalado a uma altitude de até [17] metros, e sua massa total é de [18] kg.

Os rolamentos são especificados como [19] na parte dianteira e [20] na parte traseira, com a quantidade de graxa correspondente. A graxa utilizada nos rolamentos é do tipo [21]. O esquema de ligação para a tensão nominal é [22], e o tempo recomendado para relubrificação é de [23] horas de operação. O motor possui certificações [24] que garantem sua conformidade com normas de qualidade. A relação entre a corrente de partida e a corrente nominal é de [25], com categoria de conjugado [26], e a corrente no fator de serviço é de [27] A. Os fatores que influenciam a eficiência do motor de indução podem ser classificados em diferentes aspectos, conforme ilustrado na Figura 2. O método de acionamento impacta diretamente o comportamento do motor, podendo otimizar ou prejudicar seu desempenho.

Figura 2 – Fatores que influenciam na eficiência do motor de indução.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 2, a taxa de carga influencia a eficiência, sendo que motores operando em carga parcial geralmente apresentam menores níveis de eficiência. A temperatura de operação afeta as perdas internas do motor, onde temperaturas elevadas podem aumentar as perdas resistivas e reduzir a vida útil dos componentes. Por fim, o dimensionamento de condutores adequado garante que as perdas por resistência nos cabos sejam minimizadas, contribuindo para a eficiência geral do sistema.

a) Acionamento: quando se pensa em eficiência energética em motores de indução, o rendimento é um dos principais fatores considerados. No entanto, outros aspectos também precisam ser analisados, como a escolha do método de partida adequado, que depende do tipo de processo em que o motor será utilizado. Em sistemas simples, como o controle de nível em tanques ou caixas d'água, geralmente não há controle de velocidade programável. Nessas situações, o motor é acionado por métodos como partida direta ou estrela-triângulo. Ambos os métodos geram um pico de corrente no início, o que pode resultar em um maior consumo de energia ao longo do funcionamento do motor.

b) Taxa de carga: a taxa de carga em motores de indução refere-se à relação entre a carga aplicada ao motor (ou seja, a potência que ele está entregando) e a capacidade nominal do motor. Essa taxa é expressa como uma porcentagem e é um indicador de quão eficientemente o motor está operando em relação à sua capacidade projetada. A equação (1) define como calcular essa taxa.

$$\text{Taxa de carga (\%)} = \left(\frac{\text{potência de saída real (KW)}}{\text{potência nominal (KW)}} \right) \times 100 \quad (1)$$

A taxa de carga em eficiência energética diz muito se o motor vai consumir mais energia do que o necessário. Um motor bem dimensionado, operando próximo a sua taxa de carga nominal tende a ser mais eficiente, pois perdas internas são proporcionais a sua carga e o efeito dessas perdas é minimizado. Outro ponto é com

relação a sua vida útil, em operação normal o equipamento não irá ter perdas por efeito joule elevadas.

Já em motores que a taxa de carga está abaixo de 50%, a eficiência é diminuída significativamente, como citado acima, as perdas internas no motor continuam mesmo quando o motor está com um alívio de carga, com isso o fator de potência diminui, fazendo assim aumentar o tráfego de energias reativas na rede.

c) Temperatura de operação: a temperatura de operação é um parâmetro muito importante para a vida útil do motor e a própria eficiência energética em si. Atualmente existem classes de isolamentos nas bobinas dos motores, essa temperatura deve ser respeitada visto que Valores elevados de temperatura podem por exemplo representar o início de uma falha ou indícios de sobrecarga. A transformação de energia elétrica em energia térmica pode representar um consumo de energia maior. A falta de manutenção preventiva nesses equipamentos pode agravar a situação, a dissipação de calor é algo que deve ser pensado para aumentar assim a vida útil dos equipamentos. Alternativas como ventilação forçada, termômetros no interior do motor, acompanhamento preditivo pode evitar tais falhas e diminuir o consumo elétrico dos motores de indução.

d) Dimensionamento de condutores: com o avanço da tecnologia em processos produtivos, máquinas e equipamentos, a saúde e segurança não podem ficar para trás. O correto dimensionamento dos condutores de energia elétrica é de suma importância, condutores especificados abaixo mínimo necessário, podem sofrer um superaquecimento causando derretimento e consequentemente curto-circuito.

Além desse problema, o mal dimensionamento pode resultar em quedas de tensão excessivas que do ponto de vista de eficiência energética é ruim pois o motor vai operar fora da faixa recomendada pelo fabricante.

Para a determinação da bitola dos condutores, é necessário saber de alguns parâmetros. A corrente nominal, distância do equipamento até o ponto de alimentação, fator de potência, rendimento, tensão, capacidade de condução de

corrente dos condutores e entre outros. Na equação (2) podemos ver como se determina a corrente nominal de um motor elétrico trifásico.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos\phi \times \eta} \quad (2)$$

onde: I é a corrente (A); P é a potência (W); V é tensão (v); $\cos\phi$ é o fator de potência e η é o rendimento. O item 6.5.1.3.1 da NBR 5410 (instalações elétricas de baixa tensão) diz que “No dimensionamento dos condutores do circuito terminal que alimenta exclusivamente um motor, deve ser considerada uma corrente de projeto IB no mínimo igual à corrente nominal do motor, nas condições de utilização.”

Ainda na norma NBR5410 sobre dimensionamento de condutores, na alínea 6.2.7.1 item “C” Nos traz que a queda de tensão não deve passar de 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição. A equação (3) refere-se ao cálculo de queda de tensão.

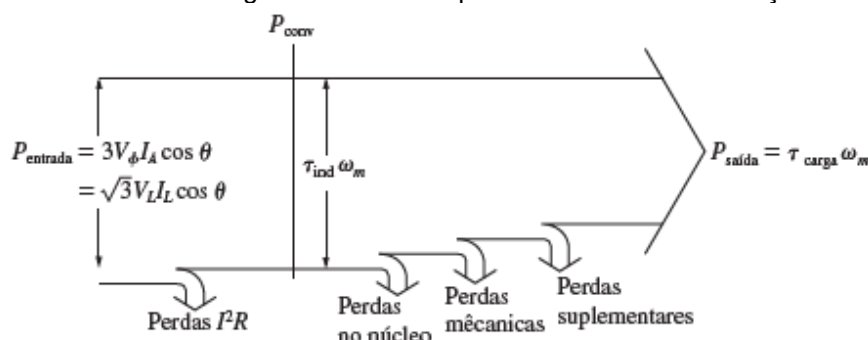
$$\Delta v = \frac{2 \times L \times I \times R_{condutor}}{A} \quad (3)$$

onde Δv é a queda de tensão; L é o comprimento do condutor em metros; I é a corrente elétrica em amperes; $R_{condutor}$ é a resistividade do condutor; A é a área de seção transversal do condutor em mm². Para utilizar um motor elétrico de indução de forma eficiente, é importante seguir algumas regras. Quanto menos perdas ocorrerem ao transformar energia elétrica em energia mecânica, maior será a eficiência. Utilizar a energia de maneira inteligente ajuda a reduzir o consumo. Na Figura 3 observa-se o fluxo de potência nos equipamentos citados.

Todos os sistemas, seja ele mecânico, hidráulico, pneumático ou elétrico sofrem algum tipo de perda, com isso, o rendimento total do sistema diminui e o gasto energético aumenta para compensar esse tipo de desperdício. Nas máquinas de indução trifásicas, as perdas estão relacionadas majoritariamente com o efeito joule, temos também uma pequena parcela direcionada as perdas mecânicas da máquina. O rendimento pode ser calculado por (Chapman, 2013):

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% \quad (4)$$

Figura 3 – Fluxo de potência no motor de indução.



Fonte: Chapman (2013, p.185).

Nos motores elétricos ocorrem os tipos de perdas conforme seguinte: perdas no cobre, no núcleo, perdas mecânicas e suplementares. Os enrolamentos do estator e do rotor são compostos de cobre condutor para gerar um campo magnético e dessa forma gerar o conjugado mecânico. Para essa transformação há nos condutores um aquecimento devido a circulação de corrente elétrica. Podemos definir essas perdas com base na equação (5).

$$P = 3 \times I_a^2 \times R_a \quad (5)$$

em que I_a é a corrente que flui em cada fase da armadura e R_a é a resistência de cada fase da armadura. A equação (6) refere-se as perdas no cobre do rotor de uma máquina de indução trifásica.

$$P_{pcr} = I_F^2 \times R_F \quad (6)$$

onde I_F é a corrente que flui no enrolamento de campo do rotor, e R_F é a resistência do enrolamento de campo. As perdas no núcleo ocorrem devido à histerese e correntes parasitas no metal do motor. Essas perdas variam com o quadrado da densidade de fluxo e, no estator, com a potência de 1,5 da velocidade de rotação dos campos magnéticos (Chapman, 2013).

As perdas mecânicas incluem o atrito nos rolamentos e as perdas por ventilação, causadas pelo atrito entre partes móveis e o ar dentro do motor, variando com o cubo da velocidade de rotação. As perdas no núcleo e mecânicas são chamadas de perdas rotacionais a vazio, que podem ser estimadas ao medir a potência de entrada do motor vazio. As perdas suplementares são aquelas que não se enquadram nas categorias anteriores e representam, por convenção, cerca de 1% da carga total (Umans, 2014).

Em comparação com um motor com ano de fabricação mais recente e com melhor rendimento, nota-se a diferença na construção física da máquina girante, conforme informações a seguir:

- a) **Chapas magnéticas:** Com chapas de melhor qualidade fazendo parte do sistema do rotor e do estator, pode-se obter menores perdas por histerese e por correntes induzidas. Em comparação com motores da linha standard as perdas são bem maiores. É possível obter também um melhor resultado realizando tratamentos térmicos e redução da espessura das chapas, com isso pode-se reduzir ainda mais as perdas associadas ao bom funcionamento do equipamento.
- b) **Ventilador:** A construção física do ventilador é projetada para ter uma melhor eficiência, sendo possível uma melhor troca térmica e reduzindo as perdas por ventilação.
- c) **Enrolamentos do Estator e do Rotor:** Na fabricação, são utilizados cobre de melhor qualidade e menor resistência elétrica, contribuindo com a redução das perdas por efeito joule.
- d) **Rolamentos:** São empregados rolamentos especiais com menor coeficiente de atrito entre as esferas e a pista do rolamento. Com isso é possível ter ganhos com relação à diminuição de perdas energéticas e aumento da vida útil desses elementos.

2.2 MÉTODOS DE PARTIDA PARA ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

Nesta seção serão discutidos os aspectos relacionados aos principais métodos para o acionamento de motores de indução. O princípio de funcionamento de qualquer motor de indução, é baseado na interação entre campos magnéticos (entre o rotor e o estator) tendo com resultante o torque na ponta do eixo para movimentação de cargas conforme projeto e aplicação.

No momento em há energização no estator da máquina através de uma tensão alternada cria-se um campo girante, a medida em que esse campo corta os condutores presente no rotor, cria-se um força-eletromotriz, em paralelo é criado também um campo magnético que interage com o estator, com isso é produzido o torque magnético que resulta na rotação do rotor. Além disso, é necessário que a velocidade do rotor seja um pouco menor que a rotação do campo do estator, com isso temos a rotação síncrona do equipamento conforme equação (7):

$$W_s = \frac{120 * f}{p} \quad (7)$$

onde W_s é a rotação síncrona; f é a frequência da rede elétrica e p é o número de polos magnéticos do motor.

2.2.1 PARTIDA DIRETA

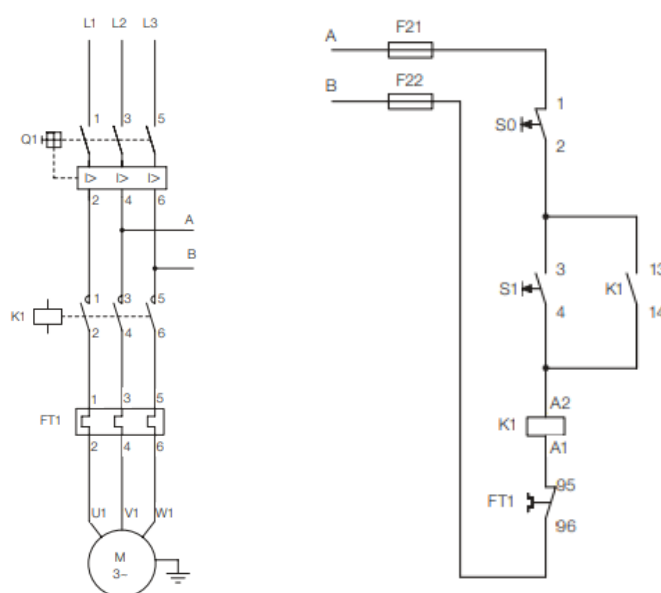
O método de acionamento de um motor de indução trifásico por partida direta, é o método mais simples e com baixo custo para a conversão de energia elétrica em energia mecânica, é também um método limitado e que não oferece nenhum tipo de controle. A ligação consiste em conectar diretamente os terminais das bobinas de forma ordenada na rede de alimentação elétrica, fazendo assim com que o motor funcione em sua capacidade nominal de rotação por minuto (RPM).

O diagrama elétrico potência é a forma com que se representa a ligação entre rede elétrica, elementos de ligação, elementos de proteção e carga. Já um diagrama de comando, representa a sequência de acionamento para que a carga entre em funcionamento corretamente (Chapman, 2013). Na Figura 4 observa-se o diagrama

de potência e comando de uma partida direta, recomendações de ligação segundo a fabricante WEG.

No diagrama da Figura 4, o disjuntor termomagnético Q1 protege o sistema contra curtos-circuitos, interrompendo o fornecimento de energia ao motor em caso de sobrecorrente. O contator K1 é responsável por ligar e desligar o motor sob comando dos botões de controle, enquanto o relé de sobrecarga térmico FT1 monitora a corrente do motor, desligando o circuito em caso de sobrecarga prolongada, protegendo assim o motor.

Figura 4 – Diagrama de potência e comando de uma partida direta.

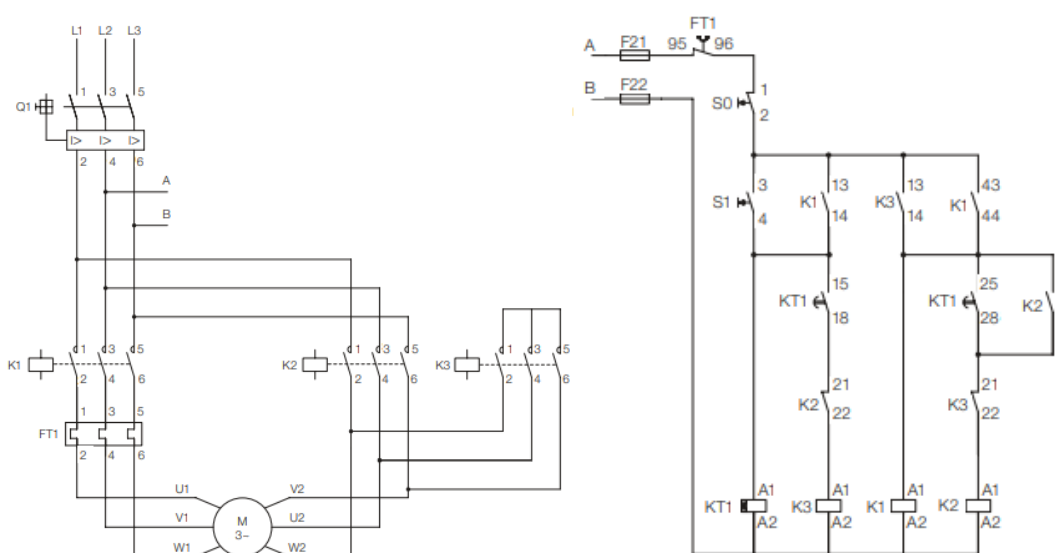


Fonte: Guia de partidas WEG

O motor trifásico M é a carga principal do circuito. Para proteção do sistema de controle, os fusíveis F21 e F22 são utilizados para evitar danos por curtos-circuitos nos comandos. O controle do motor é feito pelos botões de comando S0 e S1, onde S1 é utilizado para ligar o motor, acionando o contator K1, e S0 para desligar o motor, abrindo o circuito de controle. Esse arranjo garante a operação segura do motor, com proteção contra falhas e sobrecargas, além de facilitar o controle simples através dos botões de comando.

2.2.2 PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO

Figura 5 – Diagrama de potência e comando para um acionamento estrela triângulo.



O circuito de acionamento de um motor de indução com partida estrela-triângulo utiliza alguns componentes importantes. O disjuntor termomagnético Q1

serve para proteger contra curtos-circuitos, desligando a energia se houver uma sobrecarga. Os contadores K1, K2 e K3 são responsáveis pela transição entre as ligações em estrela e triângulo, permitindo que o motor inicie de forma mais suave.

Ainda, o relé de sobrecarga térmico FT1 desliga o motor caso ele trabalhe com sobrecarga por muito tempo, protegendo-o de danos. O motor M é o equipamento trifásico acionado, enquanto os fusíveis F21 e F22 protegem o circuito de controle. Os botões S0 e S1 são usados para desligar e ligar o motor, respectivamente. O relé temporizador KT1 faz a troca automática da ligação estrela para a ligação triângulo após um tempo pré-definido, completando a partida do motor de forma controlada e segura.

2.2.3 PARTIDA ELETRÔNICAS

Na indústria, um controle de partida de motores com elevadas cargas é crucial para o processo produtivo. Conforme citado por Mario Ramos (2005 p.36) “[...] o Soft - Starter é uma chave de partida a estado sólido microprocessada, que controla o ângulo de disparo de um conjunto de pares de tiristores, aplicando uma tensão variável nos terminais do motor durante a sua aceleração. [...]”. Com esse tipo de partida, é possível ajustar o torque do motor e a corrente de partida de acordo com as necessidades da carga, permitindo definir os valores desejados para cada aplicação. Nesse tipo de acionamento a principal função segundo Mamede Filho (2004) é o acionamento em rampa de tensão, essa função gera na saída um valor controlado de tensão na entrada do motor de indução trifásico, consequentemente possível controlar valores de torque.

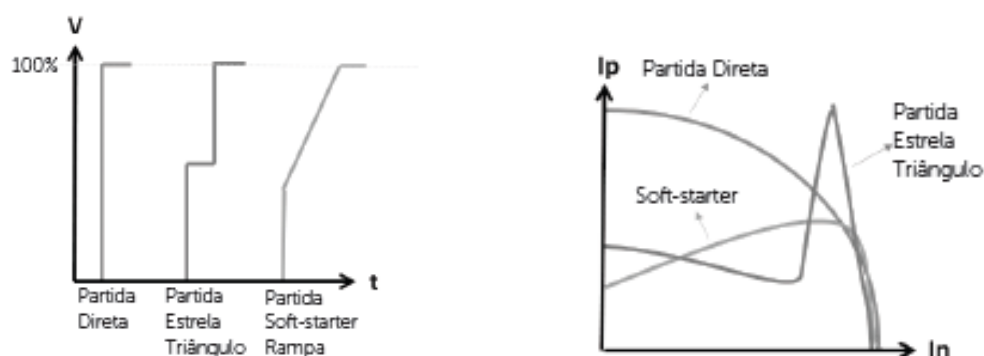
Tendo em vista as informações obtidas até o momento, podemos notar que os métodos de partidas de motores são em sua maioria, eficientes, porém incontroláveis. Segundo Luana Silva (2022) o inversor de frequência é capaz de controlar a frequência de saída através da disponibilização de energia na entrada do equipamento. Os inversores de frequência foram criados não somente para partir os motores de gaiola, mas também para controlar a velocidade e o torque do motor. Os inversores entregam ao motor as 3 fases da rede com frequências e tensões

variáveis, de acordo com a necessidade do processo ou com a necessidade do programador. Os inversores modernos, variam a frequência e calculam a tensão de forma a manter a corrente no motor constante e igual a corrente nominal do motor (Nascimento, 2015).

De acordo com Guedes (2015), o controle de chaveamento é realizado com uma ponte retificadora na entrada da alimentação trifásica. A tensão contínua ligada aos terminais de saída pelos os tiristores, que funcionam no corte ou na saturação como uma chave estática. Os transistores trabalham como botão liga ou desliga, de forma que a onda de tensão de saída do conversor de frequência é sempre quadrada, para ter uma tensão de saída mais próxima da senoidal, os transistores é que modula a largura de pulso através de uma técnica chamada PWM (*Pulse Width modulation*).

Resumidamente, em motores elétricos que utilizam a partida direta, a corrente tende a subir rapidamente nos instantes iniciais e a diminuir gradualmente com o tempo. Por outro lado, na partida estrela-triângulo, o motor é inicialmente acionado com a corrente reduzida a 1/3 da corrente nominal, devido ao seu arranjo em estrela. Após um curto período, o motor é temporariamente desligado e os terminais são comutados para a configuração em triângulo por meio de uma contatora, momento em que o motor é religado, permitindo o funcionamento com a corrente nominal. É dessa sequência de comutação que surge o nome "partida estrela-triângulo". Desta forma, observando a Figura 6, verifica-se o comportamento da corrente elétrica considerando os tipos de acionamento.

Figura 6 – Comparativo entre as partidas.



Fonte: Guimarães, Herbert Oliveira 2018

O método de partida por *soft-starter*, entre esses métodos é o melhor, pois a curva de corrente é bem acentuada, fazendo com que o motor sofra menos estresse no momento da partida. E do ponto de vista de eficiência energética esse método é um dos melhores, pois existe uma economia de energia devido ao disparo dos SCRs.

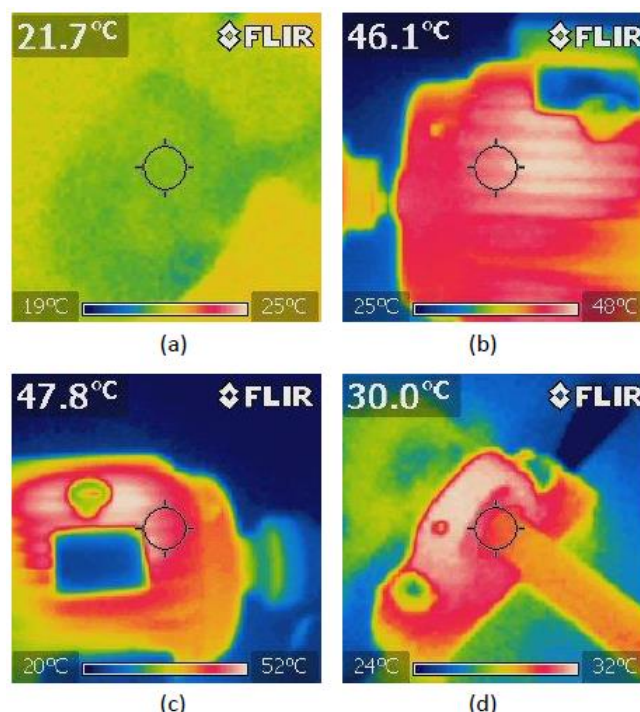
Segundo Praxedes 2011 “o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controle. Os conversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos também apresentam alto rendimento, chegando a 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação eletrônica de velocidade a potência fornecida pelo motor varia de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + conversor).”

2.3 ANÁLISE DOS EFEITOS TÉRMICOS

O trabalho de Miyamoto (2022) destaca a relevância do sistema de resfriamento e ventilação no projeto térmico de máquinas elétricas, especialmente as de pequeno porte, que geralmente são resfriadas a ar. Nessas máquinas, a temperatura do ar pode aumentar entre 18°C e 27°C durante a operação, e para cada quilowatt de perdas, é necessária uma taxa de ventilação de 0,033 a 0,05 m³/s de ar.

A Figura 7 ilustra um exemplo de ensaio termográfico em motores de indução durante sua operação. A sobrevida térmica das máquinas elétricas está diretamente relacionada à sua capacidade de dissipar calor de forma eficiente. Quando a temperatura interna excede os limites estabelecidos, o isolamento dos enrolamentos e outros componentes críticos começam a se degradar, reduzindo significativamente a vida útil da máquina. A cada 10°C de aumento na temperatura de operação acima da recomendada, a sobrevida da máquina pode ser reduzida pela metade, conforme apontado por diversas normas de engenharia.

Figura 7 – Ensaio termográfico em motores de indução.



Outro fator importante para a sobrevivência térmica é a manutenção adequada do sistema de resfriamento, seja ele a ar, água ou outro fluido. Ventiladores obstruídos, sistemas de ar sujos ou trocadores de calor entupidos podem comprometer a dissipação de calor, resultando em um aquecimento excessivo da máquina e encurtando sua vida útil. Portanto, a implementação de um sistema de monitoramento de temperatura e a manutenção preventiva são essenciais para garantir a durabilidade e a eficiência das máquinas elétricas.

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ACIONAMENTO DE MOTORES

Em qualquer tipo de indústria quando é falado em eficiência energética, logo é pensado em redução de desperdícios e redução na fatura de energia. Porém a eficiência energética vai além disso, ter um olhar técnico avançado sobre o processo em que se emprega uma grande quantidade de energia faz total diferença. Somado com tecnologias avançadas e um bom entendimento sobre as ferramentas de trabalho é possível reduzir custos e aumentar a eficiência de qualquer processo.

Em acionamentos de motores elétricos de indução, um projeto mau dimensionado e com um tipo de partida incompatível com o processo pode elevar os custos com manutenção e os custos com transformação de energia, conforme visto acima partidas por conversores eletrônicos podem ser uma ótima solução, somado com a automação e máquinas mais eficientes podemos elevar o patamar do processo.

A leitura dos dados é algo imprescindível, pois a partir deles é que podemos tirar algumas conclusões. Dados como potência ativa, reativa e aparente, corrente elétrica, tensão, fator de potência são os dados básicos para qualquer análise.

CÁLCULO DA TAXA DE CARGA: Este cálculo determinará a porcentagem no qual o motor está operando, classificando em subcarga, carga nominal ou sobrecarga.

$$Taxa\ de\ Carga\ (\%) = \left(\frac{I_{op}}{I_{nm}} \right) \times 100 \quad (8)$$

onde I_{op} é a corrente de operação da máquina e I_{nm} é a corrente nominal do motor.

CÁLCULO DE POTÊNCIA ATIVA: A potência ativa (P_a) pode ser calculada como:

$$P_a = \sqrt{3} \times V_{op} \times I_{op} \times \cos\theta \quad (9)$$

os valores de V_{op} que é relativo à tensão elétrica do motor, I_{op} que se diz respeito a corrente operacional do motor. Tem também $\cos\theta$ que o fator de potência.

POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR ATUAL: A potência útil (P_u) do motor refere-se à potência que é entregue de fato ao eixo do motor tirando os fatores de perdas, como por exemplo as perdas térmicas, perdas mecânicas e entre outros. A equação 9 diz respeito ao cálculo teórico dessa grandeza.

$$P_u = \frac{P_a \times \eta}{0,736} \quad (10)$$

onde P_a é a potência ativa e η é o rendimento da máquina de indução.

VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO PELA RELAÇÃO DE POTÊNCIAS: O cálculo fundamenta-se na relação de potências para saber se realmente vale a pena substituir

um motor em operação. Espera-se um resultado menor que 0,60. Caso o valor seja maior, é necessário avaliar outros quesitos para justificar a substituição do equipamento:

$$\Delta_{iu/inm} = P_u / P_{nm} \quad (11)$$

onde P_u é a potência útil e o P_{nm} é a potência nominal do motor.

2.4 INDICADOR DE TEMPO DE RETORNO

Payback é um indicador do tempo de retorno de um investimento e um método de tomada de decisões que considera o tempo para obtenção dos valores e o montante que deverá ser retirado dos caixas. Segundo Souza & Clemente (2004, p. 91) “o Payback nada mais é do que o número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido”.

$$PR = T_{quando} \sum_{t=0}^T CF_t = IO \quad (12)$$

Onde T é a quantidade de período de tempos (geralmente expresso em anos); PR é o período de recuperação (Payback); CF_t é o fluxo de caixa no período (t) e IO é o fluxo de caixa no investimento inicial.

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada nessa pesquisa consiste na aquisição de dados da rede elétrica de alimentação de um motor de indução trifásico que atualmente é utilizado com um conjunto bombeador no sistema de água gelada de uma indústria farmacêutica. O aparelho utilizado para essa aquisição foi um analisador de energia do fabricante embrasul, o modelo RE6000, instalado no centro de comando de máquinas, o painel principal.

Assim, foi realizado o levantamento dos dados de tensão, corrente, potências e fator de potência para a análise dos resultados. Para a parametrização foi utilizado

uma PG da Siemens, um computador industrial. Durante o período de aquisição de dados, a bomba operou de forma normal, para que não haja valores aleatórios durante a medição. Após a aquisição dos dados, foi realizada uma avaliação de eficiência energética para analisar a viabilidade da substituição do motor por um equipamento de maior eficiência.

O diagrama da Figura 8 apresenta os aspectos metodológicos para a análise de eficiência energética em um sistema de bombeamento. Ele é dividido em várias etapas inter-relacionadas, que começam com o CCM (Centro de Comando de Motores), seguido pelo uso de um analisador de energia para realizar a aquisição experimental de dados como tensão, corrente, fator de potência, além de potências ativa, reativa e aparente. A partir dos dados adquiridos, foi realizada a análise teórica da taxa de carga, potência útil e eficiência. Em seguida, foi realizada a avaliação de eficiência energética, que permite justificar o retorno de investimento, fechando o ciclo metodológico.

Figura 8 – Aspectos metodológicos da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 9 ilustra o processo realizado em campo para a aquisição das grandezas elétricas.

Figura 9 – Estrutura montada para a leitura em campo



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura, observa-se a ligação do painel, e a alocação do sensor de corrente - colocado de forma que os cabos da carga passem no interior do sensor que forma um anel, de forma paralela. Os cabos de tensão, são colocados em série com o disjuntor motor, para que seja possível a coleta dos parâmetros. E o analisador de energia é o equipamento vai armazenar os dados conforme a parametrização que será realizada em conjunto com o computador industrial.

O equipamento analisado, será um motor de indução trifásico empregado em uma parte do processo de refrigeração de água gelada de em uma indústria farmacêutica localizada em Cambé-PR. Atualmente o para refrigeração de água é necessário um sistema robusto composto por um equipamento chamado Chiller do fabricante York.

Para a circulação de água, são utilizadas bombas primárias e secundárias. O objeto de estudo será uma bomba de 30 cv instalada no lado secundário, responsável por bombear a água do trocador de calor do Chiller para as torres de resfriamento. Por ser um sistema de troca externa de temperatura, a água utilizada no circuito é

Figura 10 – Bombas secundárias 03 e placa de identificação



A coleta dos dados foi realizada em um período de operação normal do equipamento com *setpoints* definidos com base na necessidade do processo. Para essa aplicação, é utilizado o conjunto motobomba conforme ilustra a Figura 10. Esse equipamento é responsável por enviar água da torre de resfriamento para o Chiller, que por sua vez troca calor com o gás refrigerante presente no sistema para assim seguir com a refrigeração de água. O tipo de partida empregado no acionamento do motor é a estrela-triângulo, operando em 380v de tensão nominal com uma frequência de 60Hz.

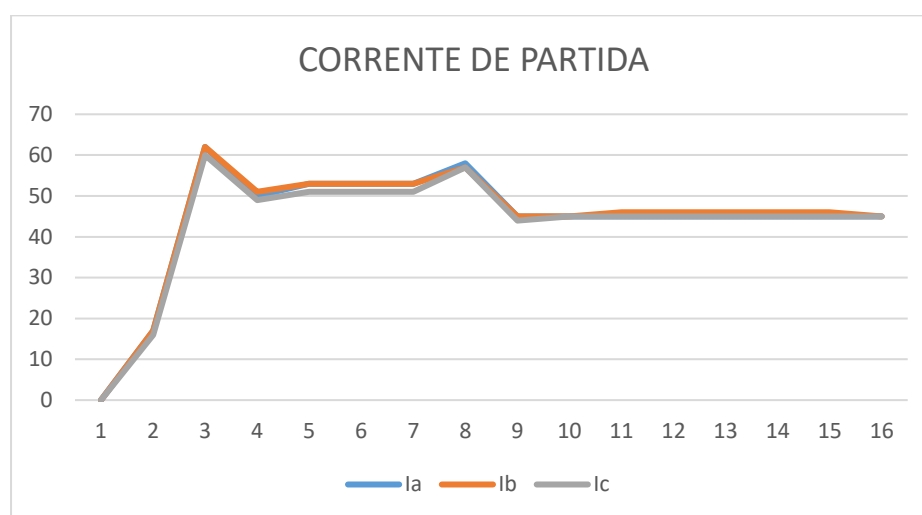
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A eficiência energética tem um papel de grande relevância no setor industrial brasileiro, justificado pelo fato de que um dos maiores gastos com energia elétrica neste setor são provenientes do acionamento de motores de indução. Com elevados

custos operacionais, o custo do produto final no caso o medicamento vendido o preço é alterado e pequenas alterações podem ser decisivos no ganho de um contrato.

A utilização de motores com melhor rendimento pode contribuir com a redução do valor da fatura de energia. Na sequência serão analisados os dados obtidos experimentalmente por meio de um analisador de energia, instalado no centro de comando de máquinas. Na Figura 11, é possível observar ver uma curva de tendência da operação do motor, que utiliza o acionamento do tipo estrela-triângulo.

Figura 11 – Gráfico de corrente partida



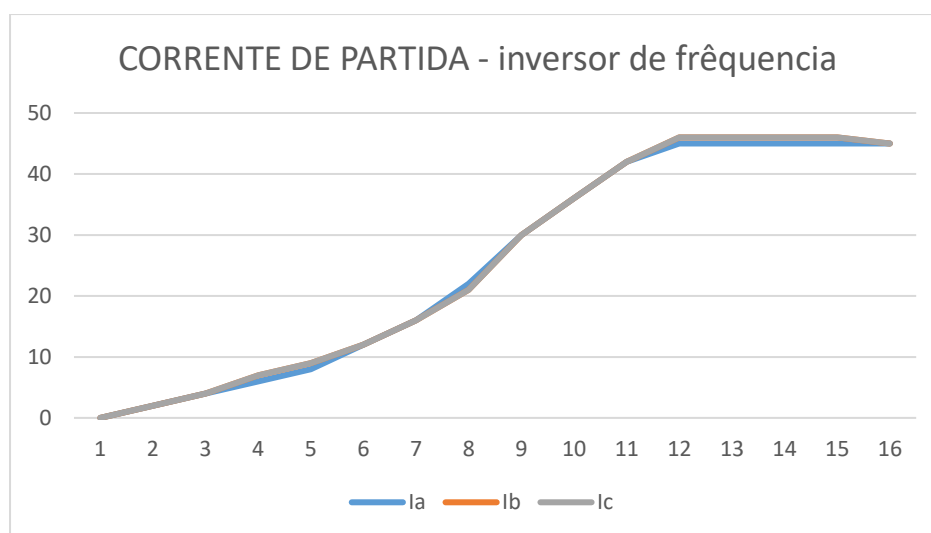
Fonte: elaborado pelos autores

Na Figura 11, no eixo Y, é possível observar o comportamento das correntes trifásicas eficaz durante o funcionamento, e o eixo X representa o tempo em segundos. É possível notar que próximo ao instante 3 segundos o pico de corrente é aproximadamente 44% superior ao valor da corrente nominal. Somente a partir do instante 9 segundos é que o motor opera em regime permanente, com a corrente nominal em cerca de 45A. Em um sistema dinâmico a quantidade de vezes que o motor é acionado faz total diferença no consumo.

Nesse ponto, pode-se sugerir a implementação de uma melhoria, relacionada a alteração do tipo de partida para uma partida mais suave, por meio do emprego de acionamento com *soft-start* ou um inversor de frequência. Além do ganho energético,

com esse tipo de partida o desgaste mecânico do motor é atenuado. Na Figura 12, observa-se uma simulação de partida utilizando o inversor de frequência.

Figura 12 – Gráfico de corrente partida – inversor de frequência



Fonte: elaborado pelos autores

Na figura, é possível notar que não há picos de transitórios de corrente, pois a curva do inversor é mais suave e o motor atinge a mesma corrente nominal com menos desgastes. Em comparação com a Figura 11, nota-se uma diferença entre as partidas. É importante salientar que esses dados foram coletados, extraídos e tratados. Para confecção dos gráficos foi utilizado a ferramenta Excel. A seguir, na Figura 13, ilustra-se os dados em sua forma bruta, proveniente do pacote de dados do analisador de energia.

Com a leitura dos dados brutos, é possível observar o instante de partida da bomba na referida data, podemos notar um pico muito elevado de consumo, a qual vai diminuindo até alcançar o valor nominal do equipamento. Os dados da coluna de demanda, são globais, valores exatos máximos de consumo durante o período de amostragem.

Figura 13 – Consumo na partida

					Demandas máximas por horário	
					Fora de ponta [kW]	
06/09/2024	11:13:32,00	0	0	0	06/09/2024 11:13:34,00	30,616
06/09/2024	11:13:33,00	5	12	12	06/09/2024 11:13:39,00	28,945
06/09/2024	11:13:34,00	70	71	69	06/09/2024 11:13:38,00	27,874
06/09/2024	11:13:35,00	56	56	55	06/09/2024 11:13:37,00	27,643
06/09/2024	11:13:36,00	62	63	61	06/09/2024 11:13:36,00	27,224
06/09/2024	11:13:37,00	63	64	62	05/09/2024 16:04:48,00	26,969
06/09/2024	11:13:38,00	64	64	63	05/09/2024 16:39:14,00	25,450
06/09/2024	11:13:39,00	67	66	66	05/09/2024 16:04:53,00	24,059
06/09/2024	11:13:40,00	53	53	52	06/09/2024 11:13:35,00	24,030
06/09/2024	11:13:41,00	47	47	46	05/09/2024 16:39:19,00	23,605
06/09/2024	11:13:42,00	46	47	46	05/09/2024 16:56:23,00	22,688
06/09/2024	11:13:43,00	46	47	46	05/09/2024 16:04:50,00	22,526
					05/09/2024 16:04:52,00	22,512
					05/09/2024 16:04:51,00	22,463
					05/09/2024 16:56:21,00	21,692
					05/09/2024 16:56:20,00	21,691
					05/09/2024 16:39:18,00	21,630
					05/09/2024 16:56:22,00	21,612
					05/09/2024 16:39:17,00	21,567
					05/09/2024 16:56:19,00	21,565

Fonte: elaborado pelos autores

Em comparação com um motor W22 IR3 premium equivalente em potência, porém com uma carcaça diferente (um pouco maior) do mesmo fabricante do equipamento analisado, é possível ver que o rendimento entregue pelo motor é bem melhor do que o atual (Figura 14).

Figura 14 – Dados elétricos para um motor equivalente em potência

W22 IR3 Premium																						
Potência		Carcaça	Conjugado Nominal (kgfm)	Corrente com Rotor Bloqueado (A)	Conjugado de Partida (kgfm)	Conjugado Máximo (kgfm)	Momento de Inércia J (kgm²)	Tempo máximo com rotor bloqueado (s)		Massa (kg)	Nível médio de pressão sonora dBA	Fator de Serviço	RPM	% de Carga					Tensão (V)	Corrente Nominal (A)		
kW	HP							Rendimento						Fator de Potência								
								50	75					100	50	75	100					
IV Polos																						
0,12	0,16	63	0,068	4,8	2,8	2,9	0,00049	28	62	8,3	48	1,25	1710	58	64	66	0,46	0,59	0,68	220	0,702	
0,18	0,25	63	0,103	5	2,8	2,9	0,0006	39	86	8,5	48	1,25	1700	62	67	69,5	0,49	0,61	0,7	220	0,971	
0,25	0,33	63	0,143	5,5	3,3	3,2	0,00066	30	66	8,8	48	1,25	1705	66	71	73,4	0,44	0,56	0,66	220	1,35	
0,37	0,5	71	0,212	5,1	2,4	2,7	0,00071	44	97	11,2	47	1,25	1700	75	77,5	79,2	0,48	0,62	0,7	220	1,77	
0,55	0,75	71	0,319	5,3	3	3	0,00083	14	31	12,4	47	1,25	1680	73	78	79	0,44	0,56	0,66	220	2,77	
0,75	1	80	0,426	7,3	3	3	0,00289	16	35	15,5	48	1,25	1715	82,3	83	83	0,63	0,74	0,82	220	2,89	
1,1	1,5	L80	0,621	7,4	3,4	3,4	0,00372	11	24	19	48	1,25	1725	79,5	82,5	84	0,58	0,71	0,8	220	4,3	
1,5	2	L90S	0,835	7,7	2,7	3,3	0,00655	14	31	23,1	51	1,25	1750	84	86	86,5	0,59	0,72	0,8	220	5,69	
2,2	3	L100L	1,23	7,4	2,8	3,1	0,00765	11	24	26,7	51	1,25	1745	86	86,5	87,5	0,6	0,73	0,8	220	8,25	
3	4	L100L	1,67	9,1	4	4	0,00964	15	33	39	54	1,25	1745	87,4	88,5	89,5	0,57	0,69	0,77	440	5,71	
3,7	5	L100L	2,07	8,3	4,2	4,2	0,01191	14	31	39,7	54	1,25	1740	87,5	88,5	89,5	0,56	0,69	0,77	440	7,04	
4,5	6	L12M	2,51	7	2,4	3	0,01798	16	35	45,4	56	1,25	1745	88,7	89,5	89,5	0,61	0,74	0,8	440	8,25	
5,5	7,5	L12M	3,06	7,3	2,5	3,2	0,02055	15	33	51,1	56	1,25	1750	89,7	90,3	91	0,58	0,7	0,78	440	10,2	
7,5	10	L12S	4,14	8,2	2,3	3,5	0,05631	13	29	71,8	58	1,25	1765	90,8	91,6	91,7	0,66	0,78	0,84	440	12,8	
9,2	12,5	L12M	5,09	8,5	2,4	3,5	0,06382	10	22	80,4	58	1,25	1765	91,8	92,4	92,4	0,64	0,78	0,84	440	15,6	
11	15	L12M/L	6,09	8,3	2,5	3,5	0,06721	8	18	85,5	58	1,25	1760	90,6	91,5	92,4	0,63	0,76	0,83	440	18,8	
15	20	160M	8,23	9	3,2	3,4	0,14707	13	29	138	64	1,25	1775	91,6	93	93	0,64	0,75	0,81	440	26,1	
18,5	25	160L	10,2	7,3	3	3,2	0,18125	12	26	158	64	1,25	1772	92,4	93,6	93,6	0,64	0,75	0,81	440	32	
22	30	180M	12,1	8	3,4	3,2	0,21385	20	44	178	63	1,25	1770	93	93,5	93,5	0,65	0,76	0,81	440	39,1	
30	40	200M	16,4	7	2,8	2,8	0,32017	22	48	241	66	1,25	1778	93,6	94	94,1	0,7	0,79	0,84	440	49,8	
37	50	200L	20,3	6,4	2,5	2,7	0,3728	20	44	266	66	1,25	1775	94	94,4	94,4	0,7	0,8	0,84	440	61,2	
22	30	180M	12,1	8	3,4	3,2	0,21385	20	44	178	63	1,25	1770	93	93,5	93,5	0,65	0,76	0,81	440	38,1	
30	40	200M	16,4	7	2,8	2,8	0,32017	22	48	241	66	1,25	1778	93,6	94	94,1	0,7	0,79	0,84	440	49,8	
37	50	200L	20,3	6,4	2,5	2,7	0,3728	20	44	266	66	1,25	1775	94	94,4	94,4	0,7	0,8	0,84	440	61,2	

Fontes: Weg, motor elétrico trifásico W22 p.36

Podemos observar os dados elétricos do motor weg IR3 premium, equivalente ao modelo utilizado como foco do estudo. Em comparação com os dados de placa, é

notório a diferença dos equipamentos com relação as entregas. Um motor de fabricação mais recente como esse tem vários atributos e tecnologias que fazem o consumo energético ser menor.

O rendimento e o fator de potência são informações que precisam ser levadas em consideração no momento da análise para a viabilidade de substituição. Quanto menos perdas o motor apresentar, maior será o rendimento entregue na ponta do eixo. quanto ao fator de potência, quanto mais próximo do valor unitário melhor, pois dessa maneira em conjunto com um banco de capacitores devidamente projetado é possível a diminuição de energias reativas em trânsito nas instalações elétricas industriais.

Em consonância com o exposto, uma melhoria que pode ser aplicada na situação é a instalação de bancos de capacitores descentralizados, em outras palavras, a correção do fator de potência se possível deve ser feita o mais próximo do local onde o motor está instalado. A seguir serão apresentados os cálculos para a taxa de carga e potência útil do motor.

4.1 CÁLCULO DA TAXA DE CARGA DO MOTOR ATUAL

Conforme apresentado anteriormente na Seção 2.4, a taxa de carga, é o valor em porcentagem a qual o motor opera. Substituindo os valores da equação (7) obtém-se a equação (13) e (14), que calcula a taxa de carga do equipamento. Esse valor é muito importante pois através dele é possível balancear a carga aplicada no eixo. com relação aos valores, a taxa de carga ideal seria 100%.

$$Taxa\ de\ Carga\ (\%) = \left(\frac{45}{43,7}\right) \times 100 \quad (13)$$

$$Taxa\ de\ Carga\ (\%) = 103 \quad (14)$$

Portanto a taxa de carga do motor analisado é de 103%. Esse valor nos diz que o motor está operando acima de sua capacidade máxima.

4.2 CÁLCULO TEÓRICO DA POTÊNCIA ATIVA

A potência ativa, é o tipo de potência que realiza o trabalho, pode ser conhecida também por potência útil. Com valores de tensão e corrente do equipamento é possível obter o resultado. Utilizando a equação (8) obtém-se:

$$P_a = \sqrt{3} \times 380 \times 45 \times 0,657 \quad (15)$$

$$P_a = 19,45 \text{ kW} \quad (16)$$

Podemos observar através do cálculo aproximado da potência ativa o resultado teórico da potência ativa (P_a). Porém os valores de potência ativa obtidos em campo são diferentes dos calculados. Na leitura em campo foi obtido o valor de 17 kW. A Figura 15 ilustra a leitura das potências ativa, reativa, aparente e o fator de potência respectivamente.

Figura 15 – Leituras das potências - Real

DATA	HORA	P3f	Q3f	S3f	FP3f
05/09/2024	16:05:17,00	17,879 k	20,333 k	27,076 k	0,660
05/09/2024	16:05:18,00	17,819 k	20,302 k	27,013 k	0,660
05/09/2024	16:05:19,00	17,754 k	20,277 k	26,951 k	0,659
05/09/2024	16:05:20,00	17,713 k	20,378 k	27,000 k	0,656
05/09/2024	16:05:21,00	17,702 k	20,392 k	27,004 k	0,655
05/09/2024	16:05:22,00	17,716 k	20,383 k	27,006 k	0,656

Fonte: elaborado pelos autores

4.3 CÁLCULO TEÓRICO DE POTÊNCIA ÚTIL DO MOTOR

A equação (17) fornece os valores aproximados da potência mecânica entregue ao eixo.

$$P_u = \frac{17k \times 0,91}{0,736} \quad (17)$$

$$P_u = 21 \text{ cv} \quad (18)$$

4.4 CÁLCULO DA VIABILIDADE DE SUBSTITUIÇÃO

Conforme já exposto, o cálculo teórico de substituição nos dá um direcionamento para a decisão de substituição ou não do motor.

$$\Delta_{iu/inm} = 21/30 \quad (19)$$

$$\Delta_{iu/inm} = 0,7 \quad (20)$$

Analisando apenas este resultado, obtém-se que a substituição do motor em operação não é viável. No entanto, para uma análise de viabilidade completa, é necessário avaliar outros fatores que podem justificar a troca, como a eficiência energética, o custo-benefício e a conformidade com regulamentações atuais. Vale destacar que, em 2004, há quase 20 anos, a tecnologia empregada na fabricação de motores elétricos era significativamente diferente da tecnologia atual, que apresenta avanços em materiais e *design*, visando maior eficiência.

Como parte das iniciativas para a redução do consumo de energia, entrou em vigor, em 2009, a Portaria nº 553, que estabeleceu níveis mínimos de rendimento para motores de indução trifásicos fabricados ou comercializados no Brasil. Esta medida visou garantir que novos motores apresentassem uma eficiência energética mínima, alinhada com as melhores práticas internacionais, incentivando a substituição gradual de motores antigos por modelos mais eficientes. Portanto, uma análise detalhada que considere a conformidade do motor atual com essas regulamentações, bem como seu desempenho comparado aos modelos mais modernos, é fundamental para uma decisão assertiva sobre sua substituição.

4.5 PAYBACK SUBSTITUIÇÃO DO MOTOR EM OPERAÇÃO

Conforme exposto, os critérios para a substituição de um motor de indução trifásico, não se devem ser considerados apenas os cálculos com valores

aproximados. Para a substituição do motor, também deve ser levado em consideração as rotinas de manutenção no equipamento, analisando: i) quantidade de rebobinagens que o equipamento já sofreu; ii) histórico de manutenção do equipamento; iii) tempo de operação; iv) ambiente no qual está exposto; v) temperatura da carcaça do equipamento; e vi) a resistência elétrica das bobinas.

Todos esses fatores devem ser considerados no momento da troca, pois influenciam diretamente no rendimento do equipamento. Assim, para a avaliação da viabilidade de substituição do equipamento, foi utilizado o *software* See+ do fabricante WEG motores elétricos. Na análise foi levado em consideração a troca de apenas um motor da linha *standard* da fabricante WEG atualmente em operação. Desta forma, foi realizado a cotação de um novo equipamento equivalente em potência ao atual existente na empresa, porém da linha W22 IR3 Premium, conforme observa-se na Figura 16.

Figura 16 - Orçamento motor de indução



Motor Elétrico Weg de 30cv, 1765 RPM, 220/380v Trifásico
(30cv-4P-B3D-11581846)

Rotação: 1750 RPM (4 Polos) | Modelo: W22 IR3 Premium

Motor Elétrico Weg de 30cv (22kw), 1750 RPM, 220/380v Trifásico, 4 Polos, W22 IR3 Premium, IP55, B3D (NÃO TEMOS O MOTOR EM ESTOQUE E O PRAZO O ENVIO ESTA EM APROXIMADAMENTE 7 DIAS E APÓS A COMPRA ENTRAREMOS EM CONTATO INFORMANDO A DATA EXATA DE ENVIO DO MOTOR).

Garantia: 1 Ano Direto Com a Weg |
Disponibilidade: 7 Dias Após a Compra (SUJEITO A ALTERAÇÃO)

[▼ mais informações](#)

por: R\$ 20.692,97

QUANTIDADE

Fonte: Acervo dos autores

Conforme visto anteriormente, a tecnologia empregada na construção do motor da referida linha, é superior a linha *standard* do mesmo fabricante e atende aos requisitos mínimos de rendimento estabelecidos na lei de eficiência energética. O motor atual, trabalha cerca de 20 horas por dia, sendo desligado apenas para intervalos de manutenção. Assim, opera cerca de 355 dias por ano. O valor médio

pago pelo consumo energético na fábrica é de R\$0,60 por Kwh consumido. Essas informações foram inseridas no *software* See+ da WEG, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Interface do software See+



Dados da Aplicação

Equipamento: **Bomba Centrífuga**

Valor da Energia (R\$/kWh): **0.60**

Horas por Dia: **20**

Dias por Ano: **355**

Fonte: Acervo dos autores

Em seguida, foram inseridos os dados do motor atualmente em operação. Observa-se que o software utilizou seu banco de dados para fornecer automaticamente uma estimativa aproximada do rendimento do equipamento.

Figura 18 – Dados do motor atual

Dados do Sistema Atual

Potência do Motor: **30 cv**

Número de Polos: **4**

Tensão da Rede (V): **380**

Rendimento (%): **89.8**

Idade do Motor (anos): **22**

Número de Rebobinagens: **2**

Quantidade de Motores: **1**

Acionado por Inversor de Frequência

NÃO

Fonte: Acervo dos autores

Já com os dados do motor em operação inseridos, foi projetado um novo sistema proposto considerando o motor da linha W22 IR3 premium, como o preço médio de aquisição girando em torno de R\$ 21.000,00. A opção de plano de troca foi assinalada, portanto o motor em operação entra como parte do pagamento.

Figura 19 – Dados do sistema proposto

Dados do Sistema Proposto

Linha de Motor WEG: **W22 Super Premium**

Rendimento (%): **94.3**

Preço Médio do Motor WEG: **R\$ 21.000,00**

Considerar Plano de Troca

SIM

Fonte: Acervo dos autores

Após a inserção dos dados no software, a Figura 20 apresenta os valores estimados de economia ao longo de um ano de operação do novo sistema. É importante destacar que esses valores consideram exclusivamente a substituição do motor, mantendo inalterados todos os demais parâmetros de operação.

Figura 20 – Valores economizados

Com este Projeto de Eficiência Energética você irá:

em 1 ANO ter ECONOMIZADO

 **R\$4.953,32 | 8.255,53 kWh (4,75%)**

Fonte: Acervo dos autores

Essa alteração isolada resulta em uma redução significativa no consumo energético da planta. Adicionalmente, contribui para a diminuição das emissões de CO₂ para a atmosfera em 0,3 toneladas. Quanto ao tempo de retorno do investimento, conforme ilustrado na Figura 21, estima-se que será de aproximadamente 3,9 anos, considerando um investimento de R\$ 21.000,00.

Figura 21 – Estimativa de *payback*

e este investimento **RETORNARÁ** em
 **3,9 ANOS**

Valor Presente Líquido:	R\$ 11.748,98	
Taxa Interna de Retorno:	26.36%	TMA (%): 10,8%

Fonte: Acervo dos autores

Com base nos dados apresentados, a projeção da economia acumulada ao longo de 10 anos alcança aproximadamente R\$ 49.000,00. Trata-se de uma economia significativa, permitindo a destinação desses recursos para investimentos em outros setores da fábrica, ampliando sua eficiência e competitividade.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo a coleta e análise de dados elétricos de um motor de indução integrante do sistema de geração de água gelada em uma indústria farmacêutica. Durante o estudo, foram identificados pontos de melhoria no processo, incluindo ajustes relacionados ao acionamento da bomba. As análises realizadas permitiram identificar fatores que impactam diretamente o rendimento do motor, como o tempo prolongado de operação e as manutenções corretivas, que resultam em um desempenho abaixo do esperado, além das limitações do sistema de acionamento atual.

Com base nos resultados obtidos, a substituição do motor mostrou-se uma alternativa eficiente e economicamente viável, considerando os valores de economia energética projetados. É importante destacar que a melhoria foi implementada em apenas um motor do setor de utilidades da planta. No futuro, há potencial para ampliar o estudo aos principais motores em operação diária, o que permitirá avaliar o impacto econômico do retrofit[†] em um número maior de equipamentos.

Adicionalmente, planeja-se desenvolver um estudo mais detalhado sobre o acionamento desse sistema, incluindo a automação do processo. Este novo estudo contemplará o monitoramento e controle do fluxo de água em trânsito, que realiza a troca de calor entre os chillers e as torres de resfriamento. A implementação de um inversor de frequência para o acionamento promete melhorias significativas na qualidade da energia e uma redução ainda maior no consumo energético, consolidando os benefícios da modernização do sistema.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Quem é quem na SNTep**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/quem-e-quem>. Acesso em: 06 set. 2023.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas** [recurso eletrônico]. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CTC - Centro Técnico Científico da PUC-Rio. **Motores reconicionados desperdiçam mais de 8 TWh, representando R\$ 16 bilhões de prejuízo**. Disponível em: <https://www.ctc.puc-rio.br/motores-reconicionados-desperdicam-mais-de-8-twh-representando-r-16-bi-de-prejuizo>. Acesso em: 06 set. 2023.

[†] Retrofit: termo utilizado para referenciar melhorias que contêm trocas no setor industrial.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Eficiência energética**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-488/09%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica.pdf>. Acesso em: 05 set. 2023.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.

MIYAMOTO, R. K. Uma estratégia de compensação de afundamentos de tensão usando armazenamento de energia em volantes inerciais com motor Dahlander em frenagem regenerativa conectado à rede. **Tese de Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. 2022.

NASCIMENTO, Adilson. **Comandos elétricos**. Apostila, Cap. 1. Valinhos, 2015. Disponível em: <http://www.seaan.com.br/cursos/comandos-eletricos-basico/apostila/>. Acesso em: 18 set. 2023.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos** [recurso eletrônico]. Tradução: José Lucimar do Nascimento. Revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. Porto Alegre: AMGH, 2013.

PRAXEDES, Marcos Fernandes. **A evolução dos sistemas de partida dos motores elétricos trifásicos**. Itatiba: MIT, 2011.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Dados técnicos sobre energia**. _____ Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BFE97B06C-FB9F-44BD-989B-0134530AF910%7D&Team=¶ms=itemID=%7B85E0B30D-27C1-4A89-86EB-AB4071AD2EBD%7D;LumisAdmin=1;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D> . Acesso em: 06 set. 2023.

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Equipe do Procel**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD}>. Acesso em: 06 set. 2023.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley** [recurso eletrônico]. Tradução: Anatólio Laschuk. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. **Eficiência energética em motores elétricos**. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index#:~:text=O%20setor%20industrial%20brasileiro%20consome,%C3%A9%20consumida%20por%20motores%20el%C3%A9tricos>. Acesso em: 05 set. 2023.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE, Ademir. **Decisões financeiras e análise de investimentos**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2004.

WEG – **calculo de payback para investimento** – disponível em : <https://www.weg.net/seeplus/calculator> acesso em 05/11/24



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA SUSTENTÁVEL: reutilização de microcontroladores ARM obsoletos

Gabriel Lucas Paulino, Leonardo Borges Dos Santos, Rayane Depetriz, Rayssa Milena Castro Correia, Wesley Candido da Silva*

RESUMO

Este trabalho apresenta a continuidade de um projeto desenvolvido em parceria com o Grupo F&K, voltado para a reutilização de microcontroladores obsoletos na criação de protótipos educacionais. O estudo focou no microcontrolador STMG070KBT6, integrado a uma placa de circuito impresso (PCI) de fenolite, escolhida por baixo custo, propriedades dielétricas e facilidade de fabricação. Durante o desenvolvimento, foram realizados esquemas, impressão e montagem da placa, bem como testes em máquinas e softwares para validar sua funcionalidade. O protótipo apresentado é uma ferramenta eficiente para o ensino em cursos de elétrica, eletrônica e automação, permitindo a exploração prática de conceitos de programação e integração de sistemas, além de oferecer soluções educacionais de baixo custo, o projeto reforça a sustentabilidade ao reaproveitar componentes descartados, contribuindo para a redução de resíduos eletrônicos. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de reutilização de microcontroladores em diferentes aplicações, promovendo tanto o aprendizado técnico quanto o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas ao ensino. O estudo abre perspectivas para a criação de DevKits mais avançados, com aplicações específicas e maior integração com softwares educacionais, atendendo às demandas acadêmicas e industriais.

Palavras-chave: Microcontrolador STMG070KBT6, Placa De Circuito Impresso (PCI), DevKits, Prototipadora PROTO 1S.

SUSTAINABLE TECHNOLOGICAL EDUCATION: reuse of obsolete ARM microcontrollers

ABSTRACT

This paper presents the continuation of a project developed in partnership with F&K Group, focused on reusing obsolete microcontrollers to develop educational prototypes. The study centers on the STMG070KBT6 microcontroller, integrated into a phenolic printed circuit board (PCB) chosen for its low cost, dielectric properties, and

* Autor correspondente (e-mail): wesley.candido@sistemapiep.org.br

ease of fabrication. The development process included schematic design, PCB printing, and assembly, along with machine and software testing to validate its functionality. The prototype proved to be an effective teaching tool for courses in electrical, electronics, and automation engineering, enabling hands-on exploration of programming and system integration concepts. Besides offering cost-effective educational solutions, the project highlights sustainability by repurposing discarded components, contributing to the reduction of electronic waste. The findings underscore the potential of microcontroller reuse in various applications, promoting technical education and driving the development of new technologies for learning. The study paves the way for designing advanced DevKits with specific applications and enhanced integration with educational software, catering to academic and industrial requirements.

Key words: STMG070KBT6 Microcontroller, Printed Circuit Board (PCB), DevKits, PROTO 1S Prototyper.

1. INTRODUÇÃO

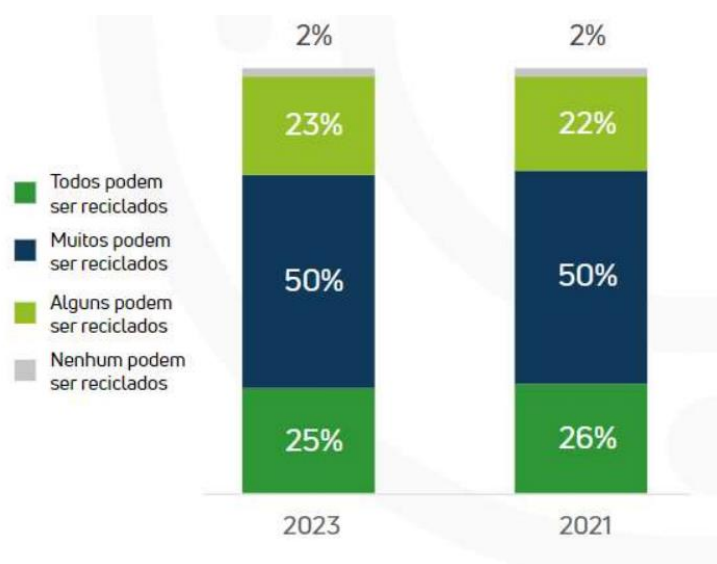
Segundo pesquisa realizada pelo Global Lixo Eletrônico Monitor em 2020, a produção global gerou aproximadamente 53,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico, no Brasil gerou-se no período de 2019, 2,1 milhões de toneladas, sendo o país classificado como o maior produtor de *e-waste* da América Latina e o quinto maior do mundo.

No que se refere a reciclagem desses resíduos, o Global Lixo Eletrônico Monitor, aponta que apenas 17,4% do lixo eletrônico mundial foi reciclado adequadamente em 2019, causando perdas significativas de materiais valiosos e em impactos ambientais negativos, no Brasil essa porcentagem é de menos de 3% do total produzido, a falta de infraestrutura, políticas públicas eficazes e conscientização são alguns dos principais desafios para melhorar essa taxa. O número de *e-waste* é projetado para atingir cerca de 74 milhões de toneladas em 2030.

A Green Eletron em 2023 apontou em uma de suas pesquisas citada pela revista Resíduos Eletrônicos do Brasil, que somente 25% dos entrevistados sabem

que todos os eletroeletrônicos podem ser reciclados, se forem descartados de forma correta, como mostra o gráfico abaixo;

Figura 1 Resultado da pesquisa do conhecimento dos entrevistados, sobre os eletrônicos serem recicláveis



O ritmo impressionante do crescimento da fabricação e consumo de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), combinado à tendência à redução da vida útil das gerações dos diversos EEE (obsolescência programada) leva à produção do chamado lixo eletroeletrônico ou resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE ou waste electrical and electronic equipment – WEEE), que assumiu proporções alarmantes em todo o mundo. Estimativas indicavam que, em 2010, haveria mais de 3 bilhões de computadores obsoletos em todo o mundo. Cerca de 1,5 bilhão de celulares são substituídos por ano. A Organização das Nações Unidas (ONU) estimava que a produção de lixo eletroeletrônico atingiria 150 milhões de t em 2010. O lixo eletroeletrônico cresce a uma velocidade três a cinco vezes maior que a do lixo urbano.

Projetado desenvolvimento de esquemático e impressão de circuito em placa de fenolite, a placa de fenolite, também conhecida como PCI (Placa de Circuito Impresso) de fenolite, é um dos materiais mais utilizados para a fabricação de placas de circuito impresso devido ao seu baixo custo, durabilidade e facilidade de

fabricação. O fenolite é um material composto por camadas de resina fenólica, reforçado por papel celulose, que possui boas propriedades dielétricas, ou seja, permite um bom isolamento elétrico, essencial para a aplicação em circuitos eletrônicos. Em circuitos de baixa e média complexidade, a placa de fenolite é uma opção ideal, especialmente em projetos de prototipagem e pequenos produtos eletrônicos (RUDIGER, 2016).

Apesar de ser amplamente utilizado, o fenolite possui especificações quando comparado a outros materiais, como o FR-4 (fibra de vidro). Este último apresenta maior resistência a temperaturas elevadas, umidade e impactos mecânicos, tornando-se mais adequado para aplicações onde o circuito estará sujeito a condições mais rigorosas. Assim, o fenolite é mais indicado para circuitos de menor complexidade e menor custo, como em protótipos ou dispositivos eletrônicos de consumo. Ainda assim, devido ao seu custo-benefício, o fenolite permanece com uma escolha popular e eficiente para muitos projetos, especialmente entre iniciantes e em ambientes educacionais (SOUZA, 2018). Devido ao objetivo principal do desafio abordado da jornada de aprendizagem, a escolha do fenolite foi feita pelo baixo custo e complexidade para impressão do circuito na mesma.

A F&K Group, é uma empresa brasileira de desenvolvimento e produção de chicotes elétricos e produtos eletrônicos, está localizada na cidade de Londrina, no estado do Paraná. Atualmente a empresa atende diretamente países como a Holanda e Estados Unidos e indiretamente outros países da Europa, Oriente Médio e América Latina.

No processo conduzido pelo Grupo F&K, foram identificadas unidades do microcontrolador modelo G070KBT6, fabricado pela STMicroelectronics, em estado de bancada (obsoletos). Essas unidades estavam inativas no processo devido à sua obsolescência nas informações previamente programadas, resultante das restrições de uso para o produto.

Os microcontroladores em questão possuem programação fixa, o que os tornava incapazes de serem regravados ou reprogramados para o seguimento. Contudo, foi

avaliado pela empresa e pelo grupo estudantil elaborador deste artigo a possibilidade de realizar um estudo detalhado do chip e suas características, para determinar potenciais soluções ou alternativas viáveis para a reutilização e/ou reciclagem desses microcontroladores.

O objetivo desse trabalho consiste em abordar a utilização do microcontrolador como componente de circuito impresso juntamente com os demais componentes soldados na placa. Para isso, será realizado o desenvolvimento de placa protótipo que possibilite a programação do microcontrolador modelo STMG070KBT6, realizando a interação do chip como os demais componentes da placa, voltado a dinâmicas de estudos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

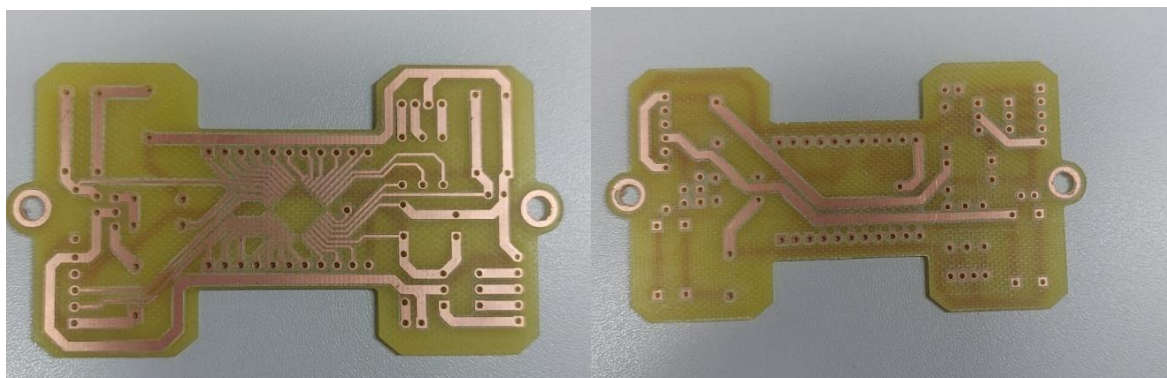
2.1. PCI - Placa de Circuito Impresso (*PCB - Printed Circuit Board*)

Nas publicações estudadas, relacionados ao assunto credita a invenção do circuito impresso a um engenheiro austríaco chamado Paul Eisler (1907 - 1995) que em 1936, enquanto trabalhava na Inglaterra, patenteou um método de se corroer uma camada de cobre depositada sobre uma superfície isolante (MEHL, s.d). Existe também registro de uma patente norte-americana de 1925, em nome de Charles Ducas, que propunha depositar uma tinta condutiva sobre um substrato isolante, que deu origem à expressão “Circuito Impresso”.

No entanto, a primeira vez que os circuitos impressos foram usados de uma forma mais ampla foi por volta de 1943, quando foram empregados em equipamentos de rádio para uso militar, onde era essencial que o circuito funcionasse em situações extremamente adversas. Após a Segunda Guerra Mundial os circuitos impressos foram usados em outras aplicações e, com o advento dos transistores, tornou-se a forma mais comum de construção de circuitos transistorizados (Chaves, 2023).

O material que compõe a base, chamado laminado, de uma PCI pode ter diferentes composições, por exemplo, fenolite (papelão impregnado com resina fenólica), fibra de vidro, resinas epóxi, composite (mistura de resina fenólica com a fibra de vidro) e materiais cerâmicos.^{10,13} O laminado é recoberto por uma fina camada de cobre (Vianna & Mantovano, 2012). Os circuitos integrados e as outras partes eletrônicas são unidos ao laminado por soldagem por meio de uma liga eutética contendo chumbo e estanho, as conexões entre os componentes ocorrem do lado contendo cobre, através de caminhos condutores, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 - PCI - Placa de Circuito Impresso (Frente e verso)



2.2. Buzzer

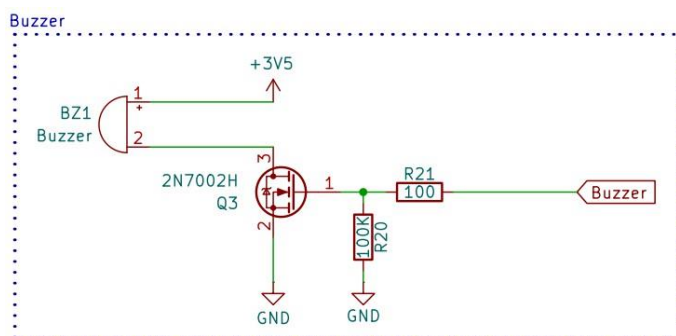
Buzzers são dispositivos eletromecânicos ou piezoelétricos utilizados para gerar sons audíveis em diferentes frequências, são amplamente aplicados em circuitos eletrônicos para emitir alertas sonoros, notificações ou sinais. O funcionamento básico de um *buzzer* varia de acordo com o tipo:

Buzzer Piezoelétrico: Utiliza um cristal piezoelétrico que vibra ao receber uma tensão alternada, produzindo som. Este tipo de *buzzer* é eficiente em consumo de energia e ideal para dispositivos portáteis ou de baixo consumo.

Buzzer Eletromecânico: Composto por uma bobina e um diafragma metálico, funciona como um pequeno alto-falante, é mais robusto, mas consome mais energia, sendo indicado para aplicações que desativam sons mais altos.

Os *buzzers* geralmente são acionados por um circuito de controle, como um *mosfet* ou transistor, o que permite o gerenciamento preciso de energia e isolamento dos componentes restantes do circuito. Resistores *pull-up* ou *pull-down* podem ser usados para evitar estados indesejados em sinais de controle, garantindo estabilidade no funcionamento do *buzzer* (Sedra & Smith, 2020). Os referidos dispositivos estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - PCI – Esquemático de um buzzer



2.3. Push buttons de 4 terminais

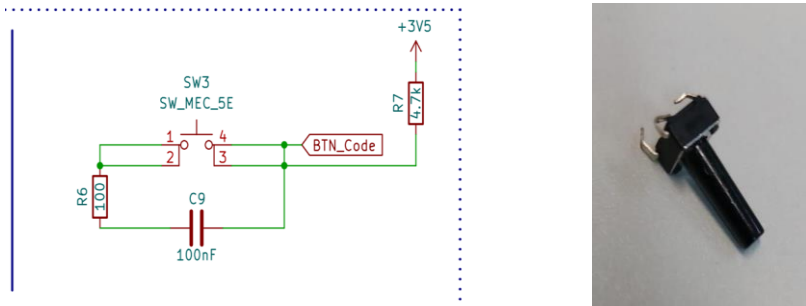
São componentes fundamentais em circuitos eletrônicos, utilizados como *switches* momentâneos para iniciar ou interromper o fluxo de corrente, suas características incluem a presença de dois pares de terminais, que permitem maior flexibilidade em aplicações, como redundância de sinal ou controle simultâneo de diferentes partes do circuito.

Segundo Rockis (2001), os *push buttons* conectam-se a dispositivos de controle, como relés ou bobinas, permitindo o acionamento de cargas em sistemas industriais. Resistores de *pull-up* ou *pull-down* são frequentemente incorporados para estabilizar

o sinal elétrico e evitar estados indesejados ou flutuantes nos circuitos digitais. Ainda, Rockis destaca que o *bouncing*, fenômeno comum em *switches* mecânicos devido à oscilação dos contatos, pode causar múltiplos pulsos indesejados no circuito, isso é tratado por meio de técnicas de *debouncing*, como a utilização de filtros RC ou algoritmos implementados em microcontroladores para eliminar os sinais espúrios.

Rockis (2001) também aponta que esses dispositivos são amplamente empregados em controles industriais, como sistemas de partida de motores, além de aplicações em interfaces de usuário, onde interagem com microcontroladores para acionar LEDs, relés e outros dispositivos. A configuração de 4 terminais permite maior flexibilidade ao projetista, seja para separar os sinais de entrada e saída ou para criar caminhos redundantes.

Figure 4 Esquemático Push button



2.4.LED RGB

Os *LEDs RGB* de três cores combinam as cores primárias vermelho, verde e azul, o que possibilita a criação de uma vasta gama de tonalidades, através do ajuste da intensidade de cada uma dessas cores, é possível gerar até 16,7 milhões de cores diferentes, tornando-os altamente versáteis para diversas aplicações, desde iluminação decorativa até displays digitais.

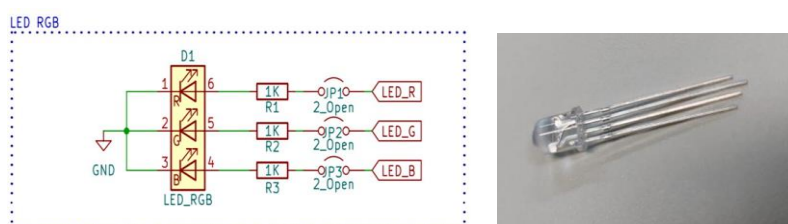
Esses *LEDs* possuem quatro terminais: um para cada cor (vermelho, verde e azul) e um pino comum, que pode ser de ânodo ou cátodo, dependendo da

configuração do *LED*, a modulação de largura de pulso (*PWM*) é amplamente utilizada para controlar a intensidade de cada cor, permitindo a variação das tonalidades em tempo real. Além disso, sistemas como o Arduino podem ser usados para programar a transição suave entre as cores, criando efeitos dinâmicos e interativos.

De acordo com diversos estudos e tutoriais técnicos, o controle preciso das cores pode ser empregado em uma série de aplicações práticas como no controle de iluminação ambiental, com diferentes parâmetros, temperatura ambiente, ou em displays, usados em televisores e painéis publicitários, por fim o uso de *LEDs RGB* também é comum em sistemas de feedback visual, oferecendo uma interface intuitiva para o usuário.

Esses componentes são essenciais para criar experiências visuais imersivas e eficientes em termos de consumo energético, com suas aplicações se expandindo cada vez mais em tecnologias como displays *OLED* e sistemas de iluminação inteligente.

Figura 5 Esquemático LED RGB



O conector USB tipo C tem formato simétrico permitindo a conexão reversível, simplificando a experiência do usuário, o componente oferece uma capacidade de transmissão de dados (até 10 Gbps) e fornecimento de energia (até 100W). A montagem do conector USB Tipo C em placas de circuito impresso (PCIs) exige atenção às especificações elétricas e mecânicas, como a capacidade de suportar correntes elevadas e a resistência física ao uso constante, para garantir a integridade do sinal e a eficiência do circuito, ferramentas de design, como o Altium Designer, são utilizadas para modelar e simular a integração do conector na PCB, assegurando a

correta distribuição de energia e dados sem comprometimento do desempenho do sistema (Phoenix Contact, 2023; Altium, 2023).

Figura 6 Conector PCI tipo C



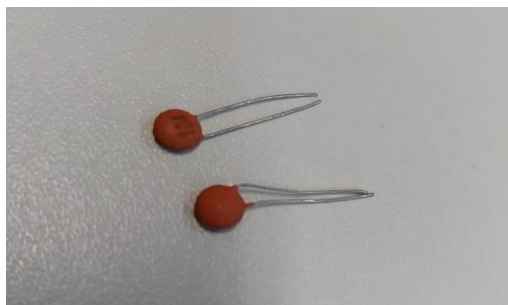
2.5 Capacitores

São amplamente utilizados para desacoplamento de sinais, armazenamento de energia e controle de transientes elétricos, a escolha do capacitor adequado e seu correto posicionamento no layout da PCI são essenciais para o desempenho ideal do circuito, reduzindo interferências eletromagnéticas (EMI) e melhorando a estabilidade de operação.

Os capacitores de cerâmica multicamada (MLCC) são utilizados devido à sua alta eficiência, tamanho reduzido e baixo custo, são eficazes em aplicações de alta frequência onde a baixa indutância é essencial. Por outro lado, capacitores eletrolíticos são preferidos em aplicações que requerem alta capacitância, como em fontes de alimentação de baixa frequência (Raisa, 2023; Newton C. Braga, 2023).

O posicionamento dos capacitores, especialmente os de desacoplamento, próximos aos circuitos integrados é fundamental para melhorar a resposta do sistema e minimizar indutâncias parasitas, o uso de múltiplos capacitores em paralelo pode compensar frequências diferentes e melhorar a distribuição de energia em toda a PCI. Ferramentas como o Altium Designer ajudam a otimizar o layout e selecionar os componentes adequados, garantindo eficiência e confiabilidade no design final (Altium, 2023)

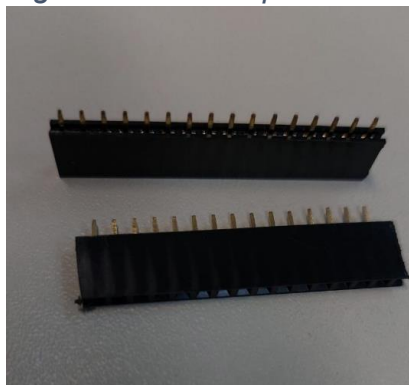
Figura 7 Capacitores



2.6. Barra de pinos Fêmea 11 vias - conector empilhável

Conforme citado por Rezende (2021) a barra de pinos fêmea de 11 vias é um conector amplamente utilizado em sistemas eletrônicos para interconexão entre placas de circuito impresso (PCIs), sendo especialmente útil em projetos modulares. Com espaçamento padrão de 2,54 mm entre os pinos, ela permite empilhamento de placas, promovendo economia de espaço e flexibilidade no design de circuitos, sua construção é composta por terminais metálicos encapsulados em uma estrutura plástica e garante resistência mecânica e elétrica adequada para diversas aplicações, como em sistemas baseados em microcontroladores e módulos periféricos

Figura 8 Barra de pinos Fêmea 16 vias - conector empilhável



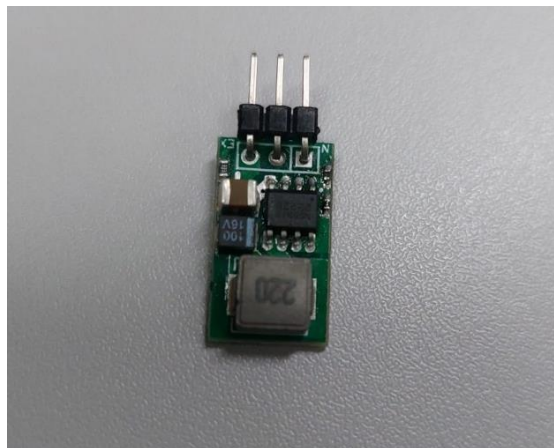
2.7 Regulador de Tensão

Reguladores de tensão desempenham um papel fundamental em circuitos eletrônicos, especificamente em placas de circuito impresso (PCIs), garantindo uma

tensão de saída estável mesmo diante de flutuações na entrada ou nas condições de carga, esse componente pode ser implementado com componente discreto ou integrados, com os circuitos integrados (CIs) sendo os mais utilizados devido à precisão e ao espaço reduzido que ocupam no projeto eletrônico.

Em *PCIs* os reguladores de tensão são frequentemente acompanhados por capacitores para eliminar ruídos de alta frequência, garantindo maior estabilidade na saída. Além disso, dissipadores de calor são recomendados quando a potência dissipada excede 1W, especialmente em aplicações com altas correntes.

Figura 9 Regulador de tensão



2.8 PROTO 1S

A prototipagem física da placa foi realizada em parceria com o Instituto Senai de Tecnologia, sendo as placas impressas pela prototipadora PCB-Proto, a mesma utiliza dois processos mecânicos para realizar sua tarefa de prototipação: o fresamento e a furação. O fresamento é um processo de remoção mecânica de material de forma lateral, através de uma ferramenta chamada de fresa, enquanto a furação é realizada por brocas que só executam furos, porém é possível furar com uma fresa, processo este muito utilizado para confecção de furos com diâmetros maiores que 2,5mm. Os processos de prototipação e de utilização da impressora

estão dispostos em outro documento, este por fim, tem como finalidade passar recomendações para quem for desenvolver as *PCI's*.

2.9 Kicad

KiCad é um software livre e de código aberto amplamente utilizado no design de circuitos impressos (*PCI's*), oferecendo uma alternativa viável a ferramentas proprietárias nas áreas de engenharia eletrônica e design de hardware, desenvolvido e mantido pela comunidade, KiCad permite que engenheiros e projetistas eletrônicos criem projetos complexos com eficácia, fornecendo um conjunto de ferramentas profissionais de forma acessível, o que torna a plataforma uma excelente escolha para estudantes, pesquisadores e pequenas empresas.

O KiCad oferece um conjunto completo de ferramentas que cobrem todas as etapas do processo de desenvolvimento de *PCI's*. Entre suas funcionalidades estão a criação de esquemáticos, o layout de *PCI's*, a verificação de regras de design (DRC), a geração de arquivos Gerber e a visualização 3D do projeto, a interface gráfica do software facilita a navegação entre as ferramentas, proporcionando um fluxo de trabalho intuitivo que simplifica a implementação e modificação de circuitos (Bauman, 2017).

A ferramenta de esquemático do KiCad permite a criação de circuitos eletrônicos de forma organizada e precisa, enquanto o layout de *PCI* oferece recursos avançados para o roteamento e posicionamento de componentes, com suporte a múltiplas camadas e vias. O software também possui bibliotecas extensivas de componentes, facilitando a integração de circuitos padrão e customizados (Kicad, s.d).

3. METODOLOGIA

A metodologia discorre de pesquisa bibliográfica e referencias técnicas práticas realizadas durante a prototipagem do projeto. A pesquisa ocorreu mediante embasamento de artigos físicos e digitais extraídos de Google Acadêmico e SciELO –

Brasil, BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento e biblioteca UniSenai Física e Digital. Em paralelo a pesquisa teórica foi realizado o acompanhamento da prototipagem do projeto físico da placa, impresso na PROTO 1S, prototipadora utilizada pelo Instituto Senai de Tecnologia, os componentes físicos soldados junto a placa foram materiais reutilizados do laboratório de automação, elétrica e eletrônica.

Por fim o microcontrolador, centro do projeto seguiu-se com o modelo 0020G070KBT6 disponibilizado pela F&K Group dando continuidade na resolução do desafio proposto. Durante as pesquisas bibliográficas priorizou-se o estudo e a apresentação dos componentes e software utilizados para impressão e montagem do protótipo físico, a fim de concluir o objetivo principal do projeto.

Foram realizados teste em softwares conforme estudo abaixo para a impressão e roteamento da placa de circuito impresso. De início seriam utilizados o software Flatcam e a CNC Router 3, uma vez que a equipe não teve contato anterior com os mesmos não havia tempo hábil para o desenvolvimento deste estudo para atendimento do objetivo proposto, considerando a troca de equipamento de impressão para ZMORPH, também disponibilizada pelo UniSenai. Na sequência será apresentado o diário de testes realizados nas tentativas de funcionamento e adequação da máquina:

- Realizado estudo superficial de modo de uso da máquina [ZMORPH](#), identificando que a mesma é [CNC](#) (Controle Numérico Computadorizado), haja vista que atua por eixos sendo X, Y e Z e seus comandos são numéricos e computadorizados;
- Atua em 3 opções sendo 3D, Route CNC e laser;
- Teste realizado com a função laser devido a maior precisão, durante o roteamento; Foi realizado a troca de peças devido o modo router
- Instalação do software que gera arquivo [.gcode](#), onde o mesmo é responsável por informar as instruções para controlá-la;
- [Voxelizer for Fab](#) - Software utilizado pela máquina;

- Realizado teste em placa de madeira;

Figura 10 Primeira tentativa de impressão em placa de madeira, com projeto enviado pelo software notebook

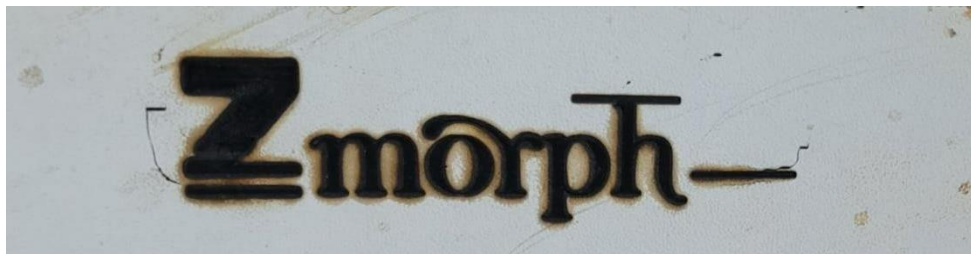
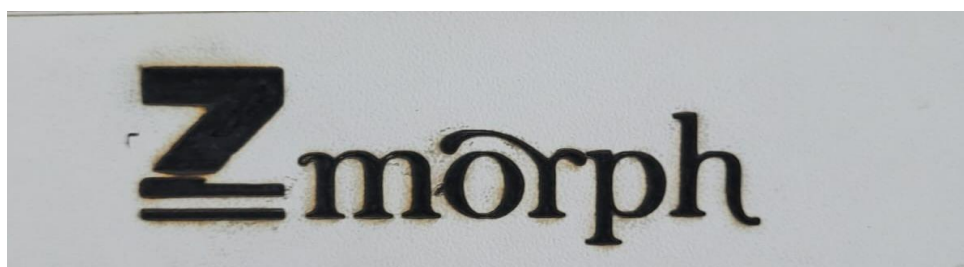
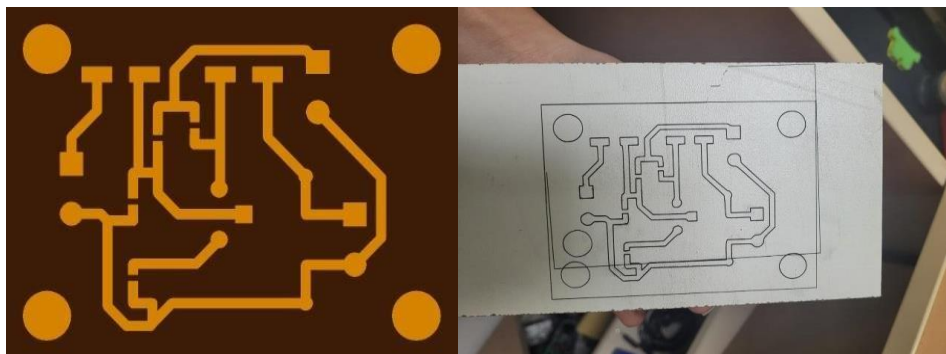


Figure 11 Teste foi rodado diretamente pela máquina sem passar por processos no notebook ou pelo software



- Realizado o estudo do software Voxelizer utilizando o [manual](#), tópico 14 exemplificando o seu funcionamento e fazendo algumas gravações em placas de madeira;
- O arquivo que deve ser importado é o DXF. Foi feito a conversão de arquivos PNG para DXF, utilizando convertido;

Figura 12 Modelo teste para impressão

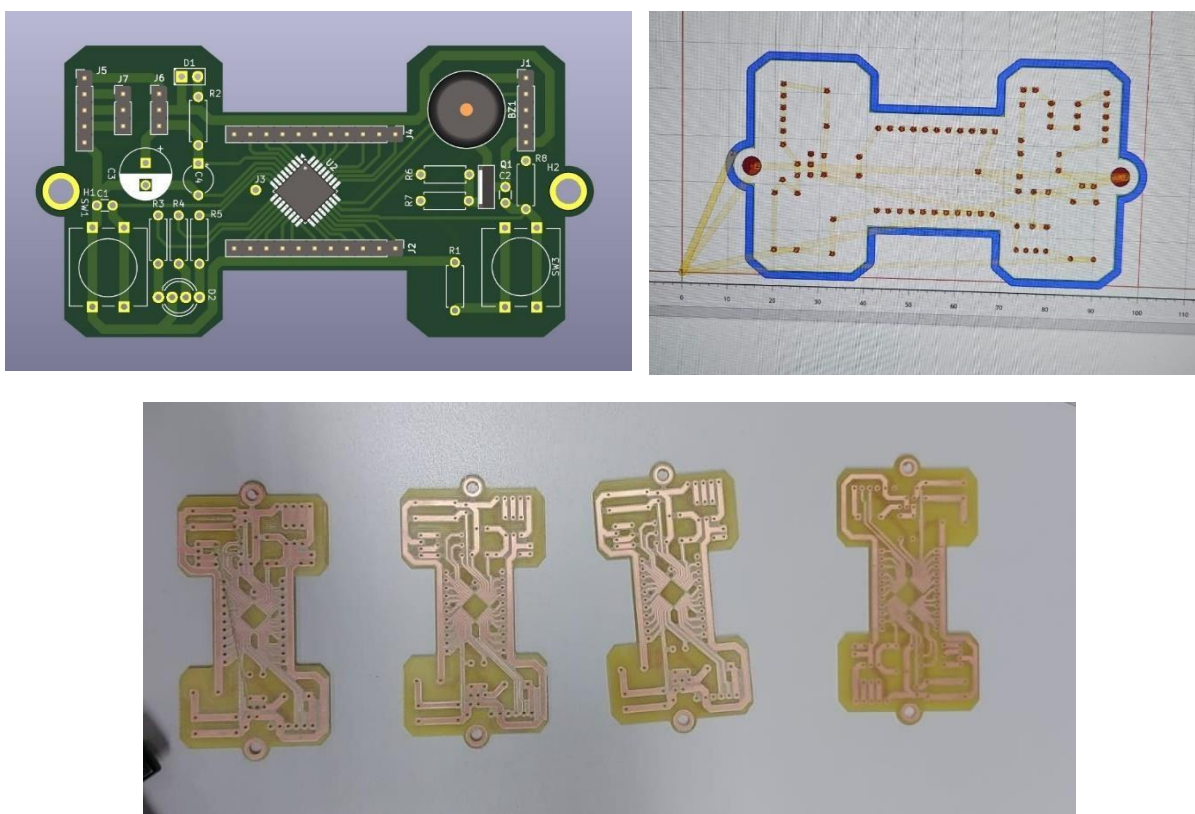


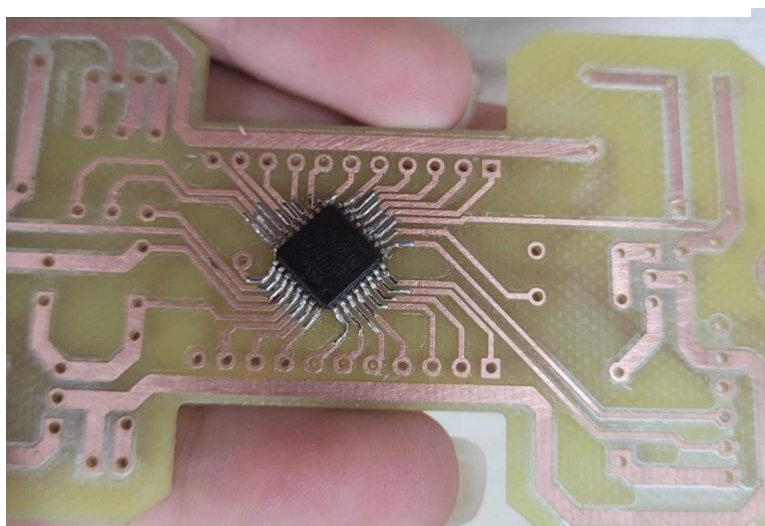
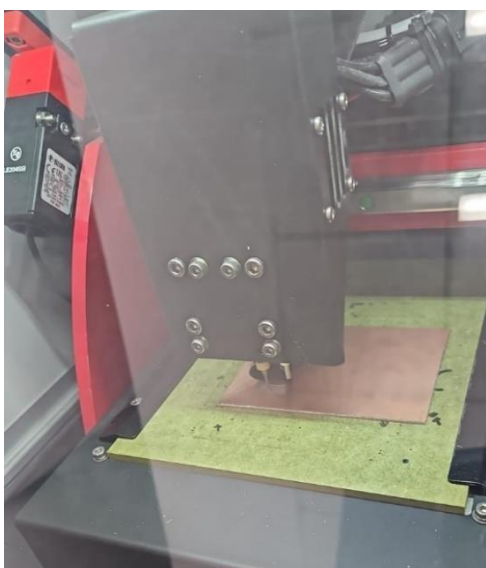
Foi identificado que a cada troca de material a ser gravado é necessário realizar a calibração do ponto inicial da máquina, que por padrão é o lado esquerdo na parte inferior. Ainda, foi identificado que não havia tempo hábil para o destrave da máquina, foi definido que a impressão seria realizada na prototipadora PROTO 1S citada acima com manual anexado ao final deste arquivo.

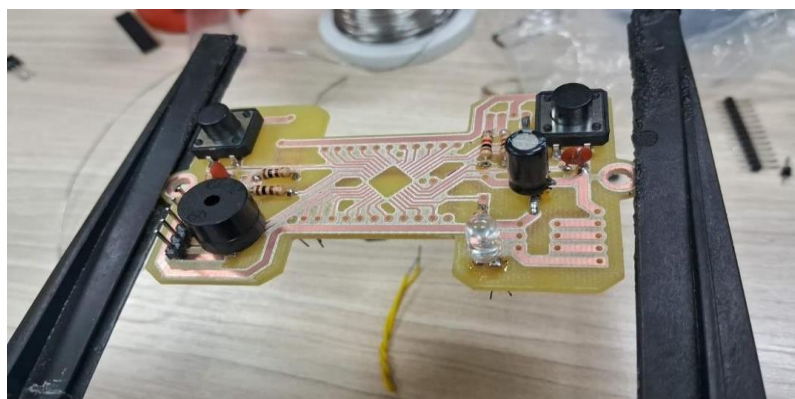
4. RESULTADOS OBTIDOS

Ao final dos estudos, obteve-se como resultado a placa prototipada de forma física possibilitando o acoplamento dos demais componentes por meio de solda com estanho, houve o teste ligando a placa a uma fonte verificando a correta impressão da trilha do circuito. Conforme imagens abaixo

Figura 13 Processo de prototipação







5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo, permitiu a aplicação dos conhecimentos adquiridos nas matérias ministrada no curso de engenharia elétrica e durante as pesquisas bibliográficas, adequada ao histórico de conhecimento técnico prático dos membros da grupo.

É importante ressaltar que o objetivo principal do tema definido pela jornada de aprendizagem em conjunto com a empresa F&K Group foi atendido, de modo que no artigo apresentado anteriormente houve o estudo completo do microcontrolador modelo STMG070KBT6 e demais componentes que tiveram seus projetos esquemáticos elaborados e também apresentados. Haja vista que no atual artigo foi apresentado as definições dos demais componentes que foram utilizados no projeto, e a partir desse estudo foi possível realizar testes conforme citado acima em máquinas e softwares diversos para atingir a prototipagem física da placa, atendendo ao objetivo de estudo dos componentes e periféricos, junto ao objetivo do

desenvolvimento de DevKits voltados a estudos para os cursos de elétrica, eletrônica e automação.

Tendo o objetivo sido alcançado, conclui-se que o estudo e elaboração de placas de circuito impresso, abrem um leque de opções para a continuação do projeto em várias vertentes, incluindo programações específicas e mais detalhadas com uma gama de softwares para esta ação

A equipe definiu em conjunto a conclusão deste tema neste artigo, disponibilizando o material para estudos paralelos ao objetivo da Jornada de Aprendizagem, projetando a utilização do protótipo para montagem de jogos que envolvam uma sequência com o *LED RGB*, montagem e de placa com maior quantidade de componentes dentro do leque de possibilidades disponíveis

REFERÊNCIAS

MEHL, Ewaldo Luiz de Mattos. Conceitos fundamentais sobre placas de circuito impresso. Disponível em: https://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf.

CHAVES, Laís E. Placas eletrônicas (PCB/PCI): o que são e para que servem? Disponível em: <https://www.engenhariahibrida.com.br/post/placas-eletronicas-o-que-sao-para-que-servem>.

[://www.engenhariahibrida.com.br/post/placas-eletronicas-o-que-sao-para-que-servem](https://www.engenhariahibrida.com.br/post/placas-eletronicas-o-que-sao-para-que-servem).

Rockis, G. (2001). *Electrical Symbols and Line Diagrams*. University of Florida. Disponível em: abe.ufl.edu

Portal Insights. (2023). *RGB LED: Tecnologia e Aplicações*. Disponível em: www.portalinsights.com.br.

Palpite Digital. (2023). *Entendendo os LEDs RGB e suas aplicações no controle de iluminação*. Disponível em: www.palpitedigital.com.br.

AranaCorp. (2023). *Modulação de cor com LED RGB*. Disponível em: www.aranacorp.com.

ALTium DESIGNER. *Diretrizes para colocação de capacitores de desacoplamento e bypass*. Disponível em: <https://resources.altium.com>.

BRAGA, Newton C. *Como ler datasheets – Capacitores* – Parte 5. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br>.

RAISA, Blog. *Capacitor SMT/SMD: O que é e noções básicas*. Disponível em: <https://blog.raisa.com.br>.

PHOENIX CONTACT. *Conectores para PCB*. Disponível em: www.phoenixcontact.com

ALTIUM. *Modelagem e Posicionamento de Conectores de PCB no Altium Designer*. Disponível em: resources.altium.com

CONECTRONICA. (2023). *Conector USB Tipo C para Montagem em PCB*. Disponível em: www.conectronica.com

Amorim, C. A. P. *CI Reguladores de Tensão*. Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá. Disponível em: [UNESP](http://unesp.br)

Projeto Simultâneo do Regulador Automático de Tensão e Estabilizador de Sistema de Potência. Repositório UFPB. Disponível em: [UFPB](http://ufpb.br)

Voltage Regulators IC: Basics and Applications. USP E-disciplinas. Disponível em: [USP eDisciplinas](http://usp.br/eDisciplinas)

KiCad EDA: *Open Source Electronics Design*. Disponível em: [KiCad](http://kicad.org).

Bauman, J. et al. *KiCad: O Software de Código Aberto para Design de Circuitos Impressos*. *Journal of Open Source Software*, v. 2, p. 1-6, 2017.

Introdução ao KiCad: Software de Design de PCB. [RoboCore](http://robo-core.com).

Processamento De Placas De Circuito Impresso De Equipamentos Eletroeletrônicos De Pequeno Porte: Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/yFF93gvdWsDNXg3pnTYWdhc/?format=pdf&lang=pt>

Indicadores De Produção De Eletroeletrônicos Disponível em: <https://eletros.org.br/indicadoreseletros/>

RUDIGER, J. *PCB de fenolite: Princípios e aplicações em circuitos eletrônicos básicos*. São Paulo: Editora Técnica, 2016.

MARQUES, A. *Processos de fabricação de circuitos impressos com fenolite*. Rio de Janeiro: Editora Circuito, 2019.

SOUZA, P. *Introdução à tecnologia de placas de circuito impresso*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

F&K Group. Chicotes Elétricos. Disponível em:
<https://fkgroup.com.br/pt/categoria.php?4014baac2e585d86e97c81beb778c6c8=5>.

AYALA, Kenneth J. **Microcontrollers: Architecture, Implementation, & Programming**. New York: West Publishing Company, 1991.

ROZÁRIO, Pablo Jean. *Microcontroladores*. 2021.

PENIDO, Édilus de Carvalho Castro; TRINDADE, Ronaldo Silva. **Microcontroladores**. *Revista Eletrônica de Microcontroladores*, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 1-80, 2013. Disponível em:
<http://www.revistaeletronicademicrocontroladores.com/artigo>. Acesso em: 25 maio 2024.

BRANQUINHO, Fernando José Cesílio; GANANÇA, Alexandre Sobrino; NUNES, Cláudio Souza; MATHIAS, Luiz Antonio Ferraro; ASENJO, Maurício Neves; JESUS, Marcos Antonio Santos de. **Desenvolvimento de um Kit Didático para Automação de um Elevador Industrial**. *Revista UNISANTA: Science and Technology*, Santos, v. 11, n. 2, p. 1-65, 2022. Disponível em:
<http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat>. Acesso em: 25 maio 2024.

PEREIRA, Fabio. **Tecnologia ARM – Microcontroladores de 32 bits**. 1. ed. São Paulo: Érica LTDA, 2012.

Machado, Carlos & Silva, Angélica & Carvalho, Diego. (2021). **A Utilização de Softwares no Ensino e Aprendizagem dos Cursos de Engenharia**. *Revista de Ensino, Educação e Ciências Humanas*. 22. 146-151. 10.17921/2447-8733.2021v22n2p146-151.

SILVEIRA, M.V.; BARTHEM, R.B. **Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126>



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS PARA ESTIMADORES DE VELOCIDADE SENSORLESS EM MOTORES CC NA INDÚSTRIA 4.0

Danilo Ferreira Fontoura, Wesley Candido Silva e Renato Kazuo Miyamoto*

RESUMO

O controle em malha fechada em motores de corrente contínua (CC) pode ser aplicado a sistemas industriais que necessitem de precisão e estabilidade da velocidade e da posição. Nessa metodologia de controle geralmente emprega-se sensores físicos dedicados, como *encoders* ou tacômetros. Assim, a proposta deste trabalho consiste na implementação de um estimador *sensorless* de velocidade em motores CC. Ao invés de utilizar sensores físicos dedicados, a proposta é empregar medições de corrente e tensão no motor para estimativa da velocidade, utilizando Redes Neurais Artificiais. Essa abordagem pode contribuir para a redução de custos e simplificar o projeto de controle do sistema. Para isso, foi desenvolvido o modelo matemático de um motor CC em ambiente computacional, para ser utilizado na coleta de dados e na validação cruzada. Os resultados obtidos demonstram uma precisão de 99,97% para operação em regime permanente, oferecendo um desempenho comparável aos sistemas que utilizam sensores tradicionais.

Palavras-chave: Estimador velocidade; MCC, Perceptron Multicamadas.

Implementation of a Sensorless Speed Estimator for DC Motor Using Artificial Neural Networks

ABSTRACT

Closed-loop control in direct current (DC) motors can be applied to industrial systems that require precision and stability in speed and position. In this control methodology, dedicated physical sensors, such as encoders or tachometers, are generally used. Thus, the proposal of this work consists of implementing a sensorless speed estimator for DC motors. Instead of using dedicated physical sensors, the approach is to employ current and voltage measurements in the motor to estimate speed using Artificial Neural Networks. This approach can help reduce costs and simplify the control system design. To achieve this, the mathematical model of a DC motor was developed in a computational environment to be used for data collection and cross-validation. The obtained results demonstrate an accuracy rate of 99.97% for steady-state operation, offering performance comparable to systems that use traditional sensors.

Key-words: Speed estimator; DC motor, Multilayer Perceptron.

* Autor correspondente (e-mail): renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

1. INTRODUÇÃO

A indústria tem testemunhado um avanço significativo na automação e no controle de sistemas, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas de inteligência artificial (IA). Dentre os diversos elementos empregados na automação industrial, os motores elétricos, em particular os motores de corrente contínua (CC), destacam-se por sua versatilidade e ampla aplicação em vários setores, sendo utilizados em diversas aplicações industriais, especialmente em situações que exigem controle preciso de velocidade e torque (CHAPMAN, 2013).

Em sistemas de impressão e processamento de papel, a utilização de motores CC pode contribuir na sincronização e na qualidade do processo. Em sistemas de tração elétrica, como trens e veículos industriais, são valorizados pelo alto torque em baixas velocidades. Os motores CC também são encontrados em máquinas-ferramenta e CNCs, essenciais para operações de usinagem precisas, além de extrusoras na indústria de plásticos e borracha, onde controlam a qualidade do produto final. Na robótica e automação, motores CC permitem o controle exato de posição e velocidade em braços robóticos, destacando-se pela precisão e flexibilidade operacional (FERREIRA et al., 2015)

O controle de velocidade desses motores pode ser realizado de duas formas: em malha aberta (MA) e em malha fechada (MF). No controle de malha aberta, a velocidade é ajustada diretamente pela variação da tensão aplicada ao motor, sem retorno de informação. Embora seja simples e econômico, esse controle pode ser impreciso, uma vez que não há correção em caso de variações de carga, o que pode causar desvios na velocidade. No controle de malha fechada clássico, por outro lado, um sistema de *feedback* monitora a velocidade do motor utilizando sensores, como encoders ou tacômetros. Esse retorno é comparado ao valor desejado, e o controlador ajusta automaticamente a tensão para corrigir qualquer diferença, garantindo maior precisão e estabilidade, mesmo com variações de carga. O controle em malha fechada é mais utilizado em situações que exigem um controle extremamente preciso e confiável (OGATA, 2011).

Desta forma, o controle de velocidade em malha fechada apresenta várias vantagens em comparação ao controle em malha aberta, especialmente em aplicações que demandam precisão e confiabilidade. Uma das principais vantagens é a capacidade de monitorar continuamente a velocidade do motor e realizar ajustes em tempo real. Para implementar o controle em malha fechada, é comum o uso de sensores físicos, como encoders, que fornecem informações precisas sobre a posição e a velocidade do motor. Essa realimentação constante melhora a precisão do controle e assegura que o motor opere de forma eficiente, reduzindo o risco de superaquecimento ou falhas mecânicas. No entanto, esses sensores podem ser dispendiosos, o que aumenta o custo de implementação do sistema (OGATA, 2011).

Assim, a principal motivação deste trabalho consiste na implementação de um estimador *sensorless* de velocidade em motores CC. Ao invés de utilizar sensores físicos dedicados, como encoders ou tacômetros, a proposta consiste em empregar medições de corrente e tensão no motor para estimar a variável velocidade, utilizando Redes Neurais Artificiais. Essa abordagem pode contribuir para a redução de custos e simplificar o projeto de controle do sistema, oferecendo um desempenho comparável aos sistemas que utilizam sensores tradicionais. Assim, espera-se que os resultados obtidos possam contribuir para o avanço das técnicas de estimação e controle de motores CC, oferecendo uma ferramenta eficiente para engenheiros e pesquisadores na área.

A pesquisa foi realizada em etapas, e iniciou-se pela modelagem matemática do motor CC, onde foram definidas as equações dinâmicas que descrevem seu comportamento. Em seguida, essa modelagem foi implementada computacionalmente utilizando o ambiente MATLAB/Simulink, permitindo simular o sistema e gerar dados necessários. Posteriormente, foi realizada a aquisição de um banco de dados do motor sob diferentes condições de operação. Esses dados foram utilizados para treinar uma Rede Neural Artificial.

Por fim, foi realizada a validação cruzada utilizando dados não treinados pela rede, que foram obtidos a partir das aquisições computacionais realizadas

previamente no MATLAB/Simulink. A seguir, são apresentados os aspectos relacionados ao estado da arte, utilizados nessa pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A modelagem matemática de motores de corrente contínua (CC) pode contribuir para a compreensão sobre seu comportamento dinâmico em diversas aplicações. Devido à sua capacidade de proporcionar controle preciso de velocidade e torque, é importante analisar suas características elétricas e mecânicas. Utilizando princípios como a lei de Kirchhoff e parâmetros relacionados à resistência e indutância, a transformada de Laplace e as funções de transferência simplificam a análise e o projeto de sistemas de controle eficientes. Esta seção aborda a formulação das equações do motor CC em excitação independente, destacando a importância da modelagem para o desenvolvimento de sistemas de controle de alta precisão.

2.1. Motor de Corrente Contínua CC

Os motores e geradores de corrente contínua destacam-se pela sua flexibilidade. Através de diferentes configurações dos enrolamentos de campo, que podem ser excitados de forma *shunt*, série, ou de maneira independente, é possível projetá-las para exibir uma vasta gama de comportamentos tanto em operações dinâmicas quanto em condições de funcionamento estável (MOHAN, 2018). Um motor de corrente contínua (CC) é um tipo de motor elétrico que converte energia elétrica em energia mecânica, utilizando corrente contínua. Existem duas configurações básicas para os motores de corrente contínua: motores com eletroímãs e com ímãs permanentes. Cada tipo possui suas características, vantagens e desvantagens, adequando-se a diferentes aplicações (CHAPMAN, 2013).

Nos motores CC com eletroímãs, o campo magnético é gerado por correntes elétricas que percorrem bobinas. Estas bobinas estão posicionadas tanto no estator

(parte fixa do motor) quanto no rotor (parte móvel). A principal vantagem dos motores com eletroímãs é a possibilidade de controle preciso sobre o campo magnético, permitindo ajustes na velocidade e no torque do motor através da variação da corrente elétrica nas bobinas. No estator, as bobinas de eletroímãs criam um campo magnético estático quando energizadas. No rotor, outra série de bobinas (ou às vezes uma única bobina denominada armadura) é alimentada por corrente elétrica através de um comutador e escovas. Esse arranjo cria um campo magnético dinâmico que interage com o campo do estator. A interação entre o campo magnético do estator e do rotor gera força sobre o rotor, fazendo-o girar (FREITAS JUNIOR; SILVA, 2018).

Nos motores CC com ímãs permanentes, os eletroímãs do estator são substituídos por ímãs permanentes. Isso elimina a necessidade de alimentação elétrica para a geração do campo magnético no estator, simplificando a construção do motor e reduzindo seu consumo de energia para a geração do campo magnético. Ao eliminar a corrente elétrica necessária para gerar o campo magnético do estator, os motores com ímãs permanentes tendem a ser mais eficientes energeticamente. A ausência de bobinas no estator simplifica a construção do motor e a ausência de escovas contribuem para uma menor necessidade de manutenção.

Nesse motor, os ímãs permanentes no estator criam um campo magnético constante. O rotor possui bobinas alimentadas por corrente através de um comutador e escovas (em versões com escovas), criando um campo magnético dinâmico que interage com o campo estático dos ímãs permanentes. A interação entre o campo magnético do ímã permanente e o campo magnético gerado no rotor resulta na rotação do rotor (UMANS, 2014).

Em contrapartida, um gerador de corrente contínua (CC) converte energia mecânica em energia elétrica através do princípio da indução eletromagnética. Assim como nos motores de corrente contínua, existem as configurações que utilizam eletroímãs ou ímãs permanentes. Ambos têm a mesma finalidade, mas operam com diferenças significativas em sua construção e aplicação. Nos geradores CC com

eletroímãs, tanto o estator quanto o rotor podem conter bobinas enroladas que funcionam como eletroímãs. A principal característica dos geradores com eletroímãs é a capacidade de controlar o campo magnético gerado, o que permite ajustar a tensão de saída do gerador. Ao ser energizado, o eletroímã do estator cria um campo magnético (FREITAS JUNIOR; SILVA, 2018).

Em alguns designs, o campo pode ser gerado pelo rotor. A energia mecânica, fornecida por uma fonte externa, como um motor a combustão ou uma turbina hidráulica, faz o rotor girar dentro do campo magnético do estator. Devido à rotação do rotor dentro do campo magnético, é induzida uma corrente elétrica nas bobinas do rotor (ou no estator, dependendo do design). A lei da indução de Faraday explica esse fenômeno, onde a variação do fluxo magnético através do enrolamento gera uma tensão elétrica. A energia elétrica gerada é coletada por meio de comutadores e escovas, sendo então direcionada para fora do gerador (UMANS, 2014).

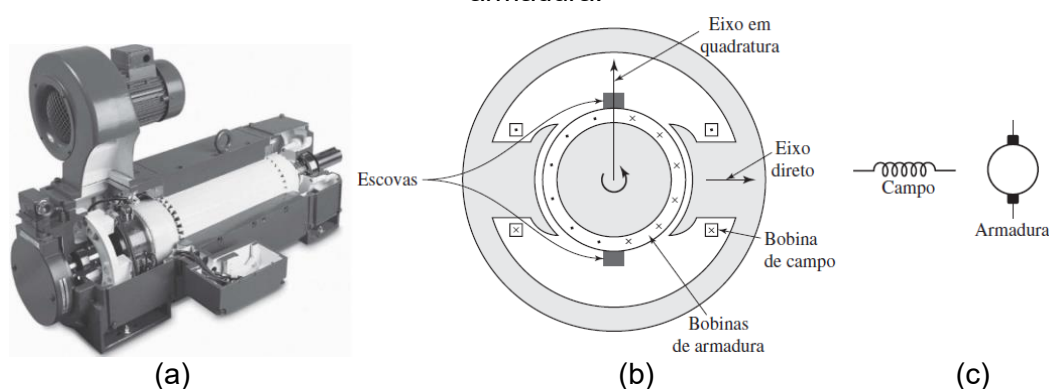
Já os geradores CC com ímãs permanentes utilizam ímãs fixos no lugar de eletroímãs para criar o campo magnético necessário para a indução de corrente elétrica. Esses geradores são tipicamente mais simples, mais compactos e têm eficiência energética melhorada em algumas aplicações, especialmente em tamanhos menores. Os ímãs permanentes fornecem um campo magnético constante. A rotação do rotor (equipado com condutores ou bobinas) dentro desse campo magnético estático induz uma corrente elétrica nos condutores. A energia elétrica induzida é extraída por meio de comutadores e escovas, assim como nos geradores com eletroímãs (FREITAS JUNIOR; SILVA, 2018).

As características fundamentais de uma máquina de corrente contínua são ilustradas de forma esquemática na Figura 1. O estator, equipado com polos salientes, é ativado por uma ou várias bobinas de campo. A distribuição do fluxo gerado pelos enrolamentos de campo no espaço entre o estator e o rotor é uniforme em torno da linha central dos polos de campo, eixo este que é conhecido como eixo de campo ou eixo direto.

A corrente alternada (CA) produzida em cada bobina da armadura rotativa é transformada em corrente contínua (CC) nos terminais externos da armadura através do uso de um comutador rotativo e escovas fixas, aos quais os condutores da armadura são conectados. Esse arranjo de comutador e escovas atua como um retificador mecânico, convertendo assim em uma tensão CC na armadura e gerando uma onda de força magneto motriz (FMM) de armadura que permanece estacionária no espaço (UMANS, 2014).

As escovas são posicionadas de tal forma que a comutação aconteça quando as bobinas se encontram na zona neutra, precisamente no meio do caminho entre os polos de campo. Assim, o eixo da onda de força magneto motriz (FMM) da armadura estará deslocado por 90 graus elétricos em relação ao eixo dos polos de campo, situando-se no eixo de quadratura. Na ilustração esquemática da Figura 1(b), as escovas são representadas posicionadas no eixo de quadratura, correspondendo à posição das bobinas às quais estão conectadas. Consequentemente, a onda de FMM da armadura se alinha ao longo do eixo das escovas, conforme indicado (UMNAS, 2014). Uma simplificação dessa representação, usada em diagramas de circuitos, é mostrada na Figura 1(c).

Figura 1 – Representação de uma máquina CC: (a) vista em corte longitudinal; (b) vista esquemática da MCC com comutador; (b) esquemático dos enrolamentos de campo e de armadura.

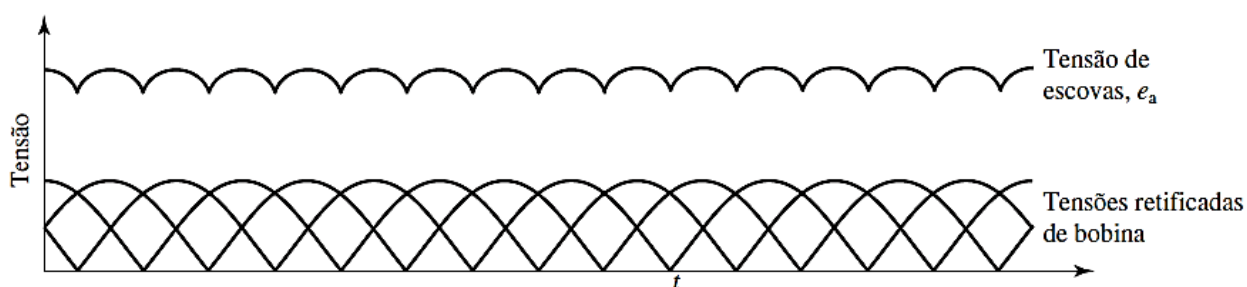


Fonte: Umans (2014, p. 404).

A tensão gerada e posteriormente retificada pela armadura pode ser observada na Figura 2. A figura ilustra o impacto da distribuição do enrolamento ao longo de

várias ranhuras, onde cada onda senoidal retificada representa a tensão produzida em uma das bobinas. O processo de comutação acontece no instante em que os lados das bobinas alcançam a zona neutra (CHAPMAN, 2013).

Figura 2 – Tensões retificadas de bobina e resultante entre as escovas de uma máquina CC.



Fonte: Umans (2014, p. 405).

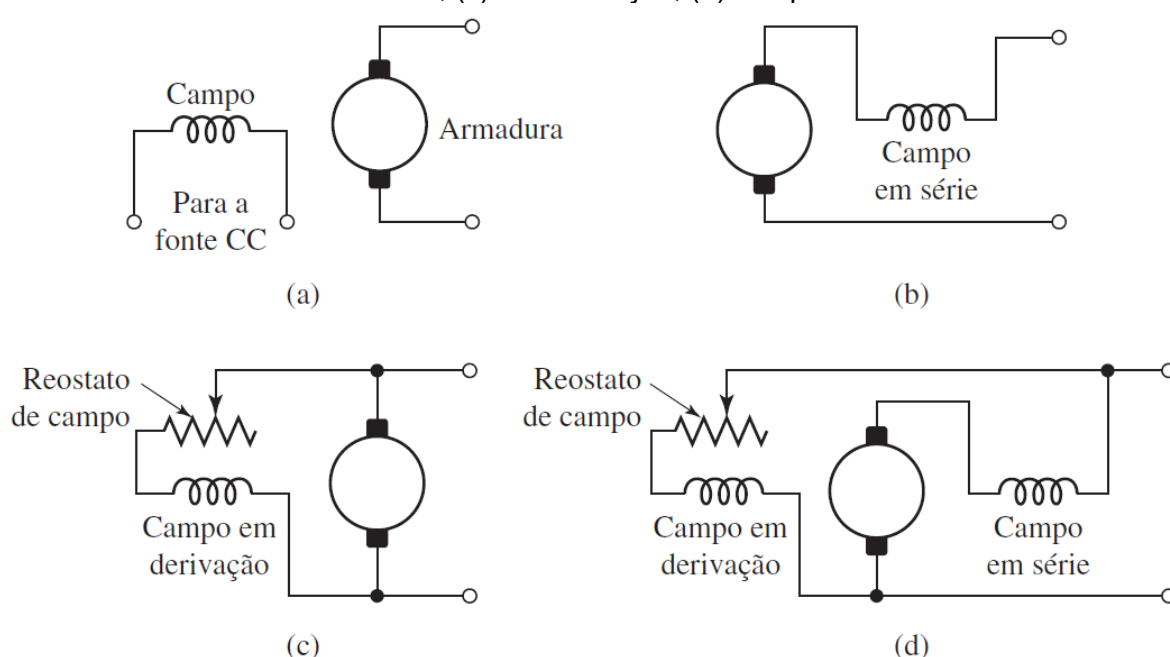
A tensão gerada que se percebe entre as escovas resulta da adição das tensões retificadas de todas as bobinas conectadas em série entre as escovas, representada pela curva ondulada e_a na Figura 2. Com aproximadamente de uma dúzia de segmentos de comutador por polo, a ondulação da tensão é significativamente reduzida, fazendo com que a tensão média detectada nas escovas seja equivalente à soma dos valores médios das tensões retificadas de cada bobina (UMANS, 2014).

As vantagens notáveis das máquinas de corrente contínua (CC) derivam da ampla gama de características operacionais que podem ser alcançadas através da seleção do método de excitação para os enrolamentos de campo. Diferentes esquemas de conexão são apresentados na Figura 3. A escolha do método de excitação tem um impacto significativo nas características de operação em estado estacionário e, em sistemas de controle, no comportamento dinâmico da máquina (UMANS, 2014).

A ligação em excitação independente em motores de corrente contínua (CC) (Figura 3(a)) é uma configuração onde a corrente de campo (ou excitação) é fornecida

por uma fonte de alimentação separada da fonte que alimenta a armadura do motor. Ou seja, o circuito de campo e o circuito de armadura são alimentados independentemente. Isso permite controlar de forma mais precisa a corrente de excitação, resultando em um controle mais flexível da velocidade e do torque do motor.

Figura 3 – Ligações do circuito de campo de máquinas CC: (a) excitação independente; (b) em série; (c) em derivação; (d) composta.



Fonte: Umans (2014, p. 407).

Em motores com excitação independente, a corrente de campo pode ser mantida constante enquanto se ajusta a tensão ou a corrente da armadura para variar a velocidade do motor. Esse tipo de controle permite uma faixa ampla de ajuste de velocidade, tornando-o particularmente útil em aplicações onde é necessária precisão no controle de velocidade e torque. Esse tipo de ligação facilita o controle de aceleração e desaceleração e melhora a resposta do motor às variações de carga.

Devido à sua capacidade de controle preciso e flexível, os motores de corrente contínua com excitação independente são amplamente utilizados em:

1. **Máquinas de corte e usinagem:** A precisão no controle da velocidade é fundamental para assegurar a qualidade e a precisão do trabalho. Em tornos, fresadoras e outras máquinas-ferramenta, o controle de velocidade proporcionado pela excitação independente é altamente vantajoso.
2. **Transportes elétricos e locomotivas:** A flexibilidade e controle de torque oferecidos pela excitação independente são ideais para sistemas de tração elétrica, que exigem variação contínua de velocidade e força de tração para diferentes condições de operação.
3. **Elevadores e guindastes:** Nessas aplicações, a capacidade de ajustar o torque e a velocidade com precisão é essencial para garantir segurança e suavidade nas operações, especialmente em situações de carga variável.
4. **Sistemas de geração e controle de energia:** Em certos sistemas de geração de energia, como grupos geradores e máquinas síncronas, motores com excitação independente são usados para controle de velocidade preciso e para garantir uma operação estável e contínua.

A excitação independente oferece um controle mais preciso sobre o desempenho do motor, proporcionando uma faixa mais ampla de controle de velocidade e torque. Esse tipo de configuração é especialmente útil em sistemas que exigem variações frequentes e rápidas de velocidade ou que operam sob condições de carga variáveis. A seguir os aspectos relacionados a modelagem matemática do motor CC em excitação independente será apresentado.

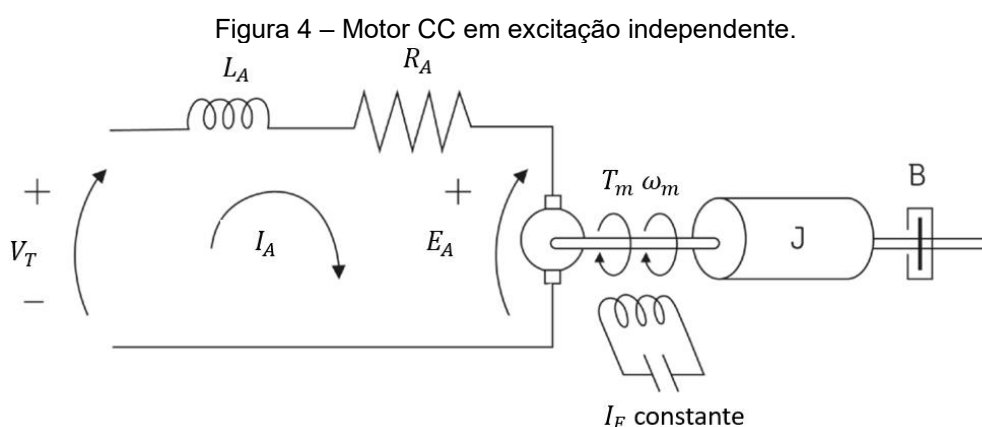
2.2. Modelo Matemático do Motor CC

Para descrever o comportamento do motor CC em excitação independente, precisamos desenvolver equações que descrevam tanto o circuito elétrico quanto o circuito magnético do motor. No circuito elétrico, usamos a lei de Kirchhoff das tensões para escrever a equação que relaciona a tensão aplicada ao motor, a queda

de tensão nos enrolamentos do campo e do induzido, e a força contraeletromotriz gerada pelo movimento do motor (MIYAMOTO, 2023).

Na modelagem do motor CC, é importante considerar parâmetros como resistência dos enrolamentos, indutância, constante de torque, constante de velocidade, coeficiente de atrito, inércia do rotor, torque de carga, entre outros. Esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho do motor em termos de velocidade, torque, eficiência e resposta dinâmica. A validação do modelo pode ser realizada através da comparação dos resultados da simulação com dados experimentais obtidos em testes com o motor real. Podemos ajustar os parâmetros do modelo para que os resultados da simulação se aproximem o máximo possível dos dados experimentais, garantindo assim a precisão do modelo (OGATA, 2011)

A modelagem de motores CC emprega a transformada de Laplace e funções de transferência para uma análise minuciosa e controle do comportamento dinâmico desses dispositivos. Desta forma, examinaremos a modelagem da função de transferência de um servomotor de corrente contínua (CC), cujo controle é realizado através da tensão terminal, conforme ilustrado na Figura 4 (MIYAMOTO, 2023).



Fonte: Adaptado de Tavares (2017, p. 145).

Esta abordagem transforma as equações diferenciais que governam o sistema em equações algébricas mais simples no domínio da frequência, simplificando a análise de estabilidade, controle e resposta dinâmica do motor. Ao aplicar a

transformada de Laplace, variáveis como corrente do enrolamento, velocidade e torque podem ser expressas em termos de "s", a variável complexa da transformada. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões no circuito de armadura obtemos (TAVARES, 2017):

$$V_T(t) = L_A \frac{dI_A(t)}{dt} + R_A I_A(t) + E_A(t) \quad (1)$$

Aplicando a transformada de Laplace, lembrando que $\mathcal{L}\left\{\frac{df(t)}{dt}\right\} = sF(s)$, obtém-se (TAVARES, 2017):

$$V_T(s) = sL_A I_A(s) + R_A I_A(s) + E_A(s) \quad (2)$$

Isolando I_A obtemos (TAVARES, 2017):

$$I_A(s) = \frac{V_T(s) - E_A(s)}{L_A s + R_A} \quad (3)$$

A tensão gerada, pode ser calculada a partir de parâmetros mecânicos (CHAPMAN, 2013):

$$E_A(s) = K \cdot \omega_m(s) \quad (4)$$

em que K é uma constante construtiva do motor CC, e ω_m é a velocidade mecânica. No motor CC, o torque mecânico (T_m) pode ser calculado em função da corrente de armadura (CHAPMAN, 2013):

$$T_m(s) = K \cdot I_A(s) \quad (5)$$

O torque, no domínio do tempo, também pode ser obtido por (CHAPMAN, 2013):

$$T_m = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (6)$$

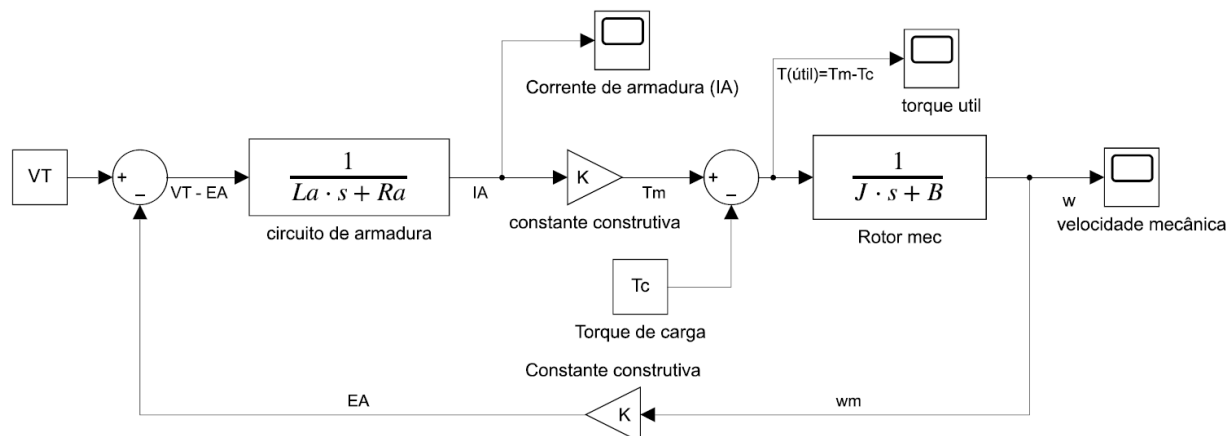
Em que J refere-se ao momento de inércia do motor e B é o coeficiente de atrito. Aplicando a transformada de Laplace, e isolando a velocidade mecânica, obtemos (TAVARES, 2017):

$$T_m(s) = \omega_m(s)(Js + B) \rightarrow \omega_m(s) = \frac{T_m(s)}{Js + B} \quad (7)$$

O conjunto de equações do motor CC pode ser agrupado no diagrama de blocos da Figura 5, que apresenta o modelo matemático em função de transferência.

Nesse modelo a entrada é a tensão terminal (V_T) e os parâmetros de saída são: corrente de armadura, torque útil e velocidade mecânica.

Figura 5 – Motor CC em diagrama de blocos de função de transferência.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por meio dessas etapas, podemos desenvolver um modelo matemático preciso e confiável do motor CC em excitação independente, que pode ser utilizado para projetar e otimizar sistemas que utilizam esse tipo de motor.

2.3. Controle de velocidade *Sensorless*

O controle de velocidade *sensorless*, que elimina a necessidade de sensores físicos dedicados para medir a velocidade ou a posição do rotor, podendo se utilizar de medidas indiretas ou algoritmos de aproximação. Essa técnica é amplamente utilizada em motores elétricos, como os de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). Essa abordagem é vantajosa em aplicações onde a instalação de sensores é desafiadora, ajudando a reduzir custos e aumentar a confiabilidade do sistema (CHAPMAN, 2013).

Uma das principais características do controle *sensorless* é o uso de modelos matemáticos do motor para estimar a velocidade e a posição do rotor. Essa estimativa baseia-se em parâmetros como resistência, indutância e torque. Métodos como observadores de estado, incluindo o observador de Kalman e o observador de

Luenberger, são frequentemente utilizados para calcular a velocidade a partir de outras variáveis do motor, como corrente e tensão (OGATA, 2011).

As vantagens do controle *sensorless* incluem a redução de custos com *hardware*, aumento da confiabilidade do sistema e um *design* mais compacto, com menos componentes eletrônicos, diminuindo os pontos de falha (CARVALHO, 2011). No entanto, os desafios permanecem: a precisão pode ser comprometida em condições de carga variável ou em motores com características indefinidas. Alterações na carga e nas características do motor podem afetar negativamente a precisão das estimativas (MIYAMOTO, 2023).

O *sensorless* é aplicado em acionamentos de ventiladores, bombas e transportadores, sendo ideal em situações em que o espaço é limitado ou onde é necessária proteção contra ambientes hostis (HAYKIN, 2001).

Essa área de pesquisa continua a evoluir, com avanços em algoritmos de estimação e a integração de inteligência artificial e aprendizado de máquina, prometendo aprimorar a precisão e robustez dos sistemas *sensorless* em diversas aplicações industriais (HAGAN; DEMUTH; BEALE, 1996).

2.4. Redes Neurais Artificiais

A aplicação de redes neurais artificiais, como o Perceptron Multicamadas (PMC), em simulações de motores de corrente contínua (CC) tem ganhado destaque devido à sua capacidade de aproximar funções complexas e prever comportamentos não lineares. Nesta seção, exploraremos os conceitos fundamentais das redes neurais, em especial o PMC, e a sua aplicação em simulações de motores CC, conforme estabelecido pela literatura.

As redes neurais artificiais (RNA) são sistemas computacionais inspirados na estrutura e no funcionamento do cérebro humano. De acordo com HAYKIN (2001), uma rede neural é composta por neurônios artificiais organizados em camadas: camada de entrada, camadas ocultas e camada de saída. Cada neurônio é interconectado através de pesos que são ajustados durante o processo de

treinamento da rede. O aprendizado da rede neural é realizado por meio de algoritmos de aprendizado supervisionado ou não supervisionado.

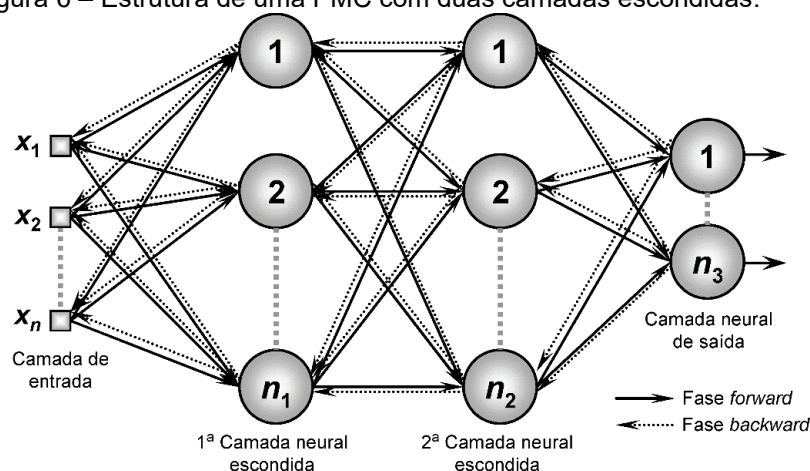
A aplicação de redes neurais artificiais, como o Perceptron Multicamadas (PMC), são caracterizadas pela presença de menos uma camada intermediária escondida de neurônios situada entre a camada de entrada e a respectiva camada neural de saída (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

2.4.1. Perceptron Multicamadas (PMC)

A modelagem de sistemas dinâmicos, como motores elétricos, pode se beneficiar significativamente do uso de RNAs, especialmente do PMC, devido à sua capacidade de lidar com a não-linearidade e variabilidade dos dados. Conforme exposto por Haykin (2001), as RNAs são particularmente eficazes na modelagem de sistemas onde a relação entre as variáveis de entrada e saída é complexa e não pode ser facilmente capturada por métodos tradicionais (HAYKIN, 2001).

O PMC é uma das arquiteturas de RNA mais utilizadas devido à sua capacidade de aprendizado e generalização. Segundo Haykin (2001), o PMC consiste em uma camada de entrada, uma ou mais camadas ocultas e uma camada de saída, conforme se observa na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura de uma PMC com duas camadas escondidas.



Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Cada camada é composta por um conjunto de neurônios, onde cada neurônio da camada anterior está conectado a todos os neurônios da camada subsequente. O processo de treinamento do PMC é realizado através do algoritmo de retropropagação, que ajusta os pesos das conexões minimizando o erro entre a saída prevista e a saída desejada.

2.4.2. Algoritmos de Treinamento

Conforme descrito por Silva, Spatti e Flauzino (2010), a presença de camadas ocultas permite ao PMC capturar relações não lineares nos dados, aumentando significativamente sua capacidade de modelagem e predição.

Os algoritmos de treinamento são de grande relevância para o desempenho das redes neurais. O algoritmo de retropropagação é o mais comum para PMCs, mas existem outras variações e métodos, como o algoritmo de Levenberg-Marquardt, que oferece um equilíbrio entre a descida gradiente e a otimização de Gauss-Newton, proporcionando uma convergência mais rápida em muitos casos (HAGAN, DEMUTH e BEALE, 1996). A escolha do algoritmo pode influenciar significativamente a eficiência e a precisão da rede.

2.4.3. *Overfitting* e Técnicas de Regularização

O *overfitting* ocorre quando a rede neural se ajusta excessivamente aos dados de treinamento, perdendo a capacidade de generalizar para novos dados. Para combater o *overfitting*, diversas técnicas de regularização podem ser aplicadas, como o *dropout*, a normalização L2 e a *early stopping*. *Dropout*, por exemplo, desativa aleatoriamente neurônios durante o treinamento, forçando a rede a aprender representações mais robustas e evitando a dependência de neurônios específicos (SRIVASTAVA et al., 2014).

2.4.4. Validação Cruzada

A validação cruzada é uma técnica estatística utilizada para avaliar a capacidade de generalização de um modelo. Segundo Hastie, Tibshirani e Friedman (2009), a validação cruzada k-fold é uma abordagem comum, onde os dados são divididos em k subconjuntos, e o modelo é treinado k vezes, cada vez utilizando um subconjunto diferente como conjunto de validação. Isso permite uma estimativa mais robusta da performance do modelo em dados não vistos.

3. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado os aspectos metodológicos utilizados neste trabalho para a implementação de uma rede neural artificial capaz de estimar a velocidade de um motor de corrente contínua.

3.1. Aplicação de PMC em Simulações de Motores CC

Os motores de corrente contínua (CC) são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais devido à sua simplicidade e facilidade de controle. A simulação do comportamento desses motores é requerida para o desenvolvimento de sistemas de controle eficientes e, com o uso da rede PMC, pode proporcionar uma aproximação precisa do comportamento do motor. Assim, foi realizado um processo de desenvolvimento de um sistema de estimativa de parâmetros para um motor elétrico, utilizando modelagem matemática, simulação no MATLAB/Simulink e redes neurais artificiais (RNA).

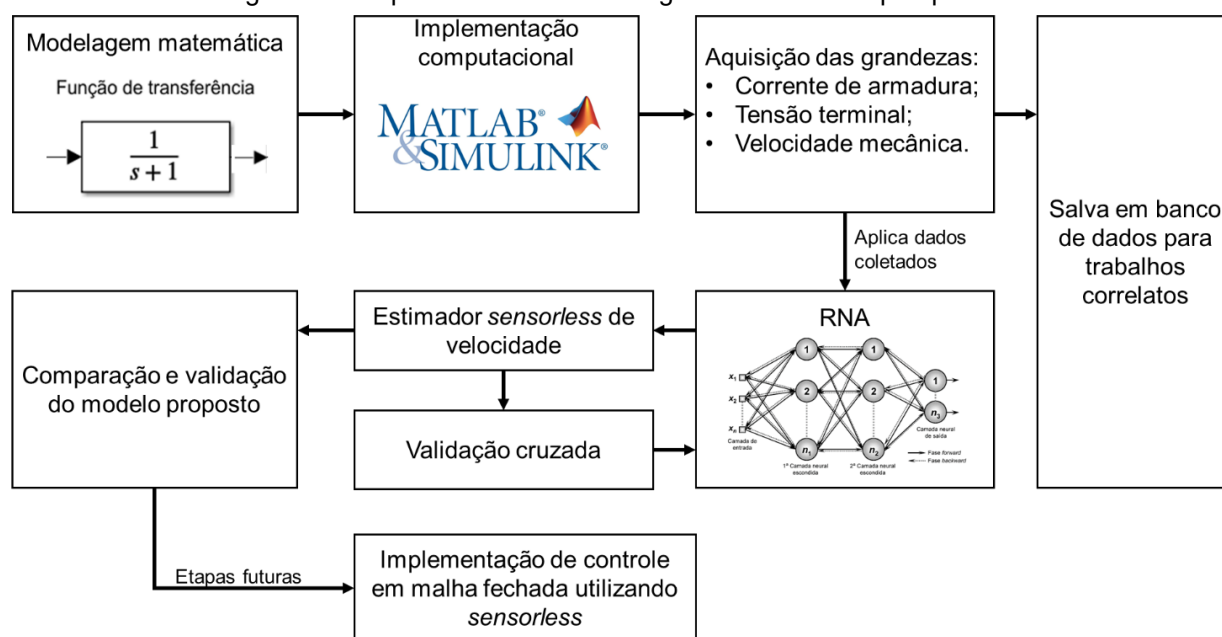
Para usar a PMC aplicada a um estimador de velocidade de motor CC foi necessário fazer a coleta de dados de entrada (como tensão e corrente) e saída (velocidade do motor). Esses dados são utilizados para treinar a rede neural, que aprende a relação entre as entradas e a saída do sistema. Após o treinamento, a rede

pode ser utilizada para prever o comportamento do motor sob diferentes condições de carga e operação.

A Figura 7 ilustra os aspectos metodológicos deste trabalho. A primeira etapa envolve a modelagem matemática do sistema, representada por uma ou mais funções de transferência, que descrevem o comportamento dinâmico do motor. Essa modelagem é implementada computacionalmente no *software* MATLAB/Simulink, permitindo simular o funcionamento do motor e analisar suas respostas dinâmicas.

Durante a simulação, são adquiridos dados fundamentais como a corrente de armadura, a tensão no terminal e a velocidade mecânica do motor. Esses dados são então utilizados em um estimador de velocidade *sensorless*, ou seja, um método que estima a velocidade sem o uso de sensores físicos, baseando-se nos parâmetros elétricos e no modelo do motor.

Figura 7 – Esquemático da metodologia utilizada nesta pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados adquiridos são aplicados a uma Rede Neural Artificial (RNA) com a arquitetura Perceptron Multicamadas (PMC), que é treinada para aprender o comportamento do motor. A RNA é capaz de prever a velocidade ou outros

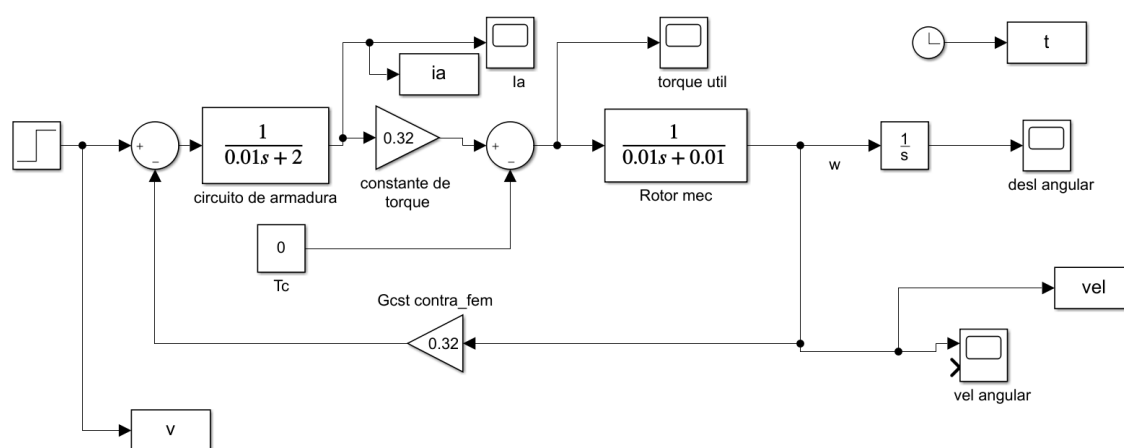
parâmetros importantes a partir dos dados de entrada. Para garantir a precisão do modelo treinado, é realizada uma validação cruzada, comparando as previsões da RNA com os dados reais para verificar sua acurácia.

Após essa etapa, o modelo proposto é comparado e validado para garantir que representa corretamente o comportamento do motor. Os dados coletados, juntamente com os resultados da simulação e da RNA, são armazenados em um banco de dados, permitindo o uso desses dados para trabalhos futuros e análises correlatas.

3.1.1. Coleta de Dados e Treinamento

A coleta de dados é uma das etapas mais importantes na aplicação de PMC, para isso foi utilizado a ferramenta Simulink do Matlab, que permite a simulação de sistemas dinâmicos, por meio de blocos prontos que representam o funcionamento de um motor ou por blocos de modelagem matemática que representem esse comportamento. Para o trabalho proposto, foi utilizado um diagrama de modelagem matemática que simula um motor CC (Figura 8).

Figura 8 – Diagrama Simulink da implementação computacional da MCC.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Aplicando as Leis de Newton, o sistema mecânico rotacional pode ser representado matematicamente por funções de transferências (OGATA, 2010). A

Tabela 1 apresenta os parâmetros elétricos e mecânicos da MCC simulada nessa pesquisa.

Tabela 1 – Parâmetros do circuito equivalente.

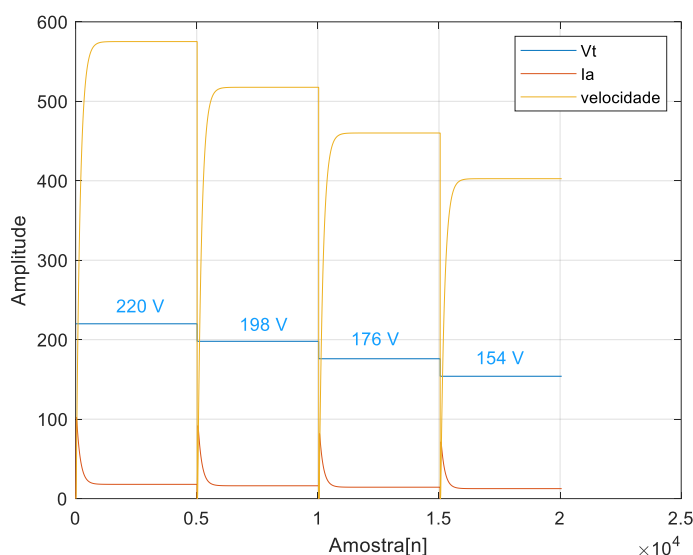
Parâmetro	Valor
Resistência de armadura (R_a)	2Ω
Indutância de armadura (L_a)	$0,01H$
Constante condutiva (K)	$0,32$
Momento de inércia (J)	$0,01 \text{ kg.m}^2$
Coeficiente de atrito (B)	$0,01 \text{ N.m/rad/s}$
Tensão terminal nominal (V_T)	$220V$
Torque de carga (T_c)	0

Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante a simulação, são coletados valores de tensão terminal de armadura (V_T), corrente de armadura (I_a) e velocidade do motor (ω). Esses dados são multiplexados e enviados para a *workspace* do Matlab. A cada simulação, foi alterado o valor da tensão terminal de armadura (V_T) e os dados coletados foram organizados em uma única tabela aplicada para o treinamento da rede neural. Na Figura 9, observa-se que foram alteradas as tensões terminais da armadura em quatro valores distintos: 220 V, 198 V, 176 V e 154 V.

Essas mudanças de tensão influenciaram tanto a corrente de armadura (I_a), quanto a velocidade do motor. Observa-se que a redução gradual da tensão terminal provoca uma diminuição tanto na corrente quanto na velocidade, refletindo o comportamento dinâmico do motor de corrente contínua em resposta às alterações de tensão.

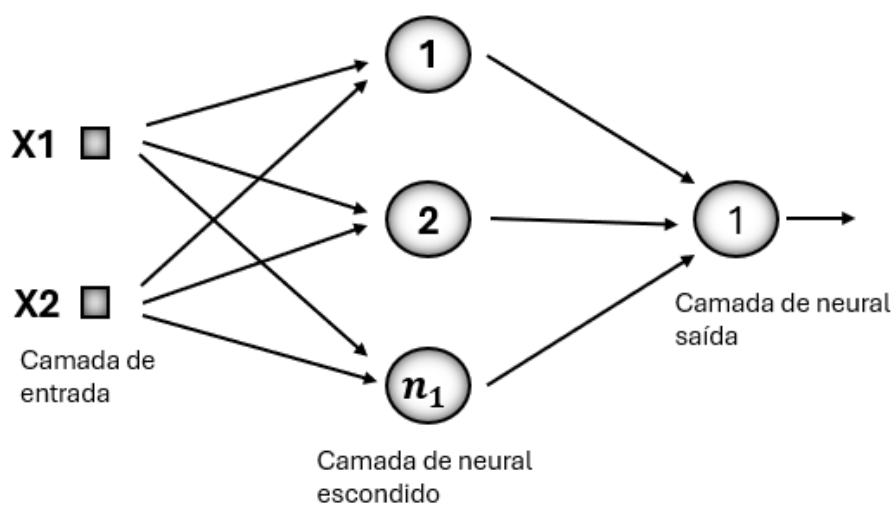
Figura 9 – Coleta de dados para treinamento da RNA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Com os valores obtidos, foi utilizado um *script* no MatLab que emprega uma rede neural PMC por aproximação. O treinamento pode exigir elevado processamento computacional, especialmente para redes com muitas camadas e neurônios e dependendo da taxa de aprendizagem e precisão aplicados. A topologia genérica da PMC proposta neste trabalho está ilustrado na Figura10.

Figura 10 – Topologia genérica da PMC.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura, X_1 e X_2 são as entradas da rede: tensão terminal de armadura (VT) e corrente de armadura (I_a) normalizados para pu; n_1 é o número de neurônios da camada escondida e a velocidade do motor (ω) é a saída da rede normalizada em pu.

3.1.2. Validação e Resultados

Após o treinamento, a rede PMC deve ser validada para verificar sua capacidade de generalização. Segundo Haykin (2001), a validação pode ser realizada utilizando um conjunto de dados que não foi utilizado durante o treinamento. A saída prevista pela rede é comparada com a saída real para avaliar a precisão do modelo.

Da mesma forma que na tabela de dados, foi feito a coleta dos valores de entradas e saída multiplexados em uma única tabela, porém, a tabela de validação recebe um nome diferente, pois é usada em etapas diferentes.

Ao obter o gráfico das curvas, é possível notar a eficiência da rede através das duas linhas que são geradas. Como forma de ajuste da rede neural em busca de um melhor resultado, alguns parâmetros foram ajustados, a saber: valores de números de neurônios, taxa de aprendizagem e precisão do sistema, fazendo com que a rede demore mais ou menos para treinar e obtenha resultados mais próximos do esperado.

No contexto de simulação de motores CC, a validação pode ser realizada comparando a saída da rede (velocidade prevista) com os dados coletados do Simulink.

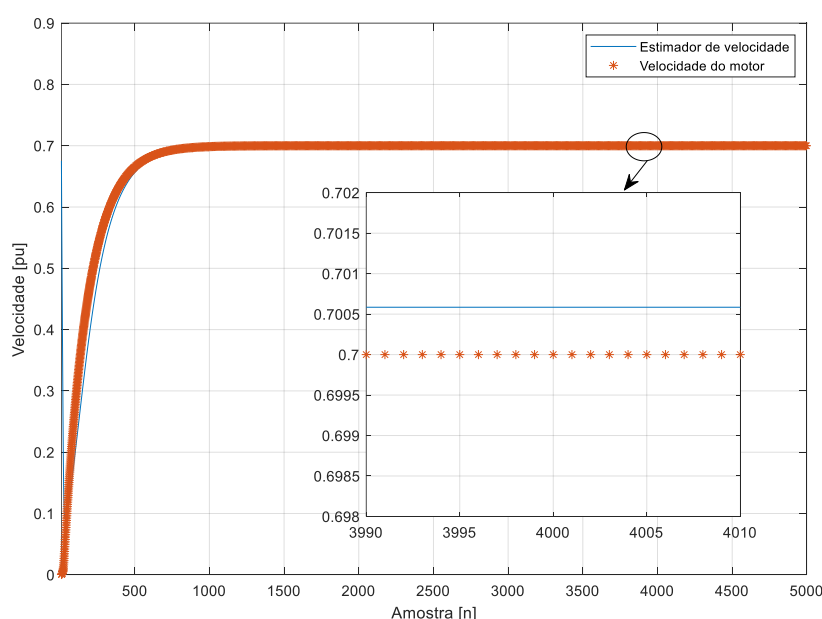
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) para estimar a velocidade de um motor de corrente contínua (CC). Foram realizados três ensaios distintos, variando o número de neurônios na camada de entrada da rede: i) com 15 neurônios, ii) com 17 neurônios e iii) com 20 neurônios. A escolha dessas configurações permitiu avaliar o impacto do

número de neurônios na precisão das estimativas de velocidade, bem como identificar o modelo mais adequado para a previsão dessa variável. Os resultados obtidos serão analisados considerando a eficácia de cada configuração em termos de precisão e capacidade de generalização da rede.

Para o ensaio 1, a rede neural utilizada, com 15 neurônios na entrada, estimou a velocidade do motor com alta precisão, obtendo uma saída de 0,7005 pu em comparação com a velocidade esperada de 0,7000 pu, resultando em um erro muito pequeno de 0,0005 pu, que resulta em uma precisão de 99,95%. Na Figura 11, observa-se que a velocidade do motor atinge rapidamente um valor estável próximo de 0,7 pu, enquanto a estimativa da rede acompanha de perto, porém com um pequeno desvio constante evidenciado no zoom entre as amostras 3990 e 401.

Figura 11 – Ensaio 1, para uma RNA com 15 neurônios.



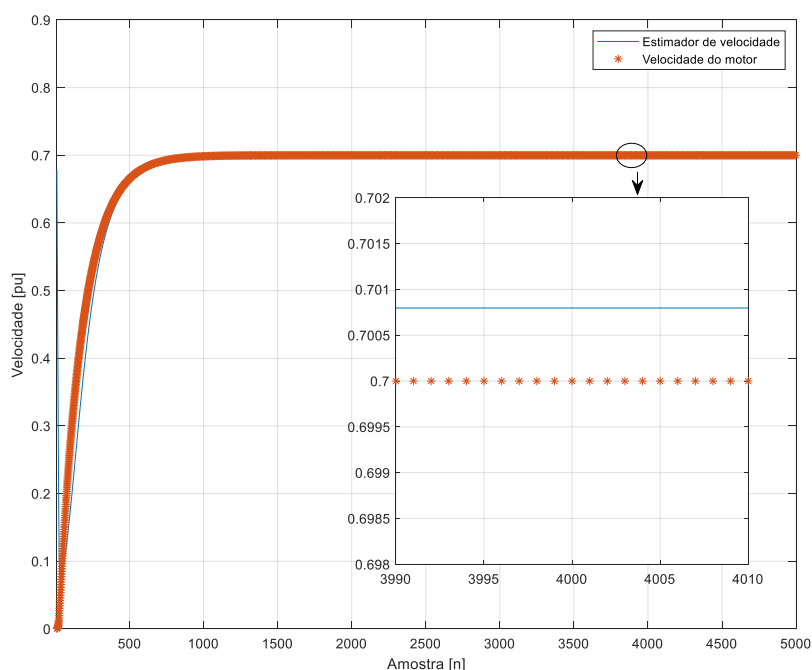
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o ensaio 2, ilustrado na Figura 12, observa-se uma simulação da velocidade do motor e do estimador de velocidade da rede neural, configurada com 17 neurônios na entrada. A rede neural alcançou uma saída de 0,7008 pu, enquanto

a saída esperada era de 0,7000 pu, resultando em um erro pequeno de 0,0008 (e precisão de 99,92%). Esse pequeno erro residual é ilustrado no zoom entre as amostras 3990 e 4010, onde o estimador se mantém um pouco abaixo da velocidade do motor.

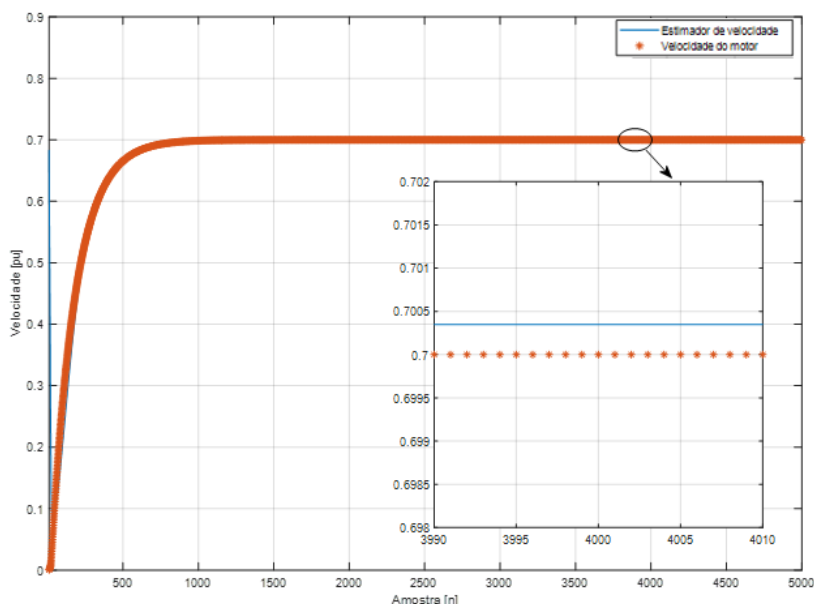
No ensaio 3, ilustrado na Figura 13, o gráfico exibe a velocidade do motor e o estimador de velocidade gerado pela rede neural. Com uma topologia de rede ajustada para 20 neurônios na entrada, a saída obtida da rede neural foi de 0,7003 pu, enquanto a saída esperada era de 0,7000 pu, indicando um erro muito pequeno de apenas 0,0003 (com precisão de 99,97%). A velocidade do motor mostra uma resposta rápida de estabilização, e o estimador acompanha essa resposta de maneira próxima, com um pequeno desvio residual visível na área ampliada entre as amostras 3990 e 4010. Esse desvio leve sugere que o modelo está bem treinado e é altamente preciso para modelar o comportamento do motor, embora ajustes finos adicionais possam ainda reduzir esse erro, caso uma precisão extrema seja necessária para a aplicação.

Figura 12 – Ensaio 2, para uma RNA com 17 neurônios.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 13 – Ensaio 3, para uma RNA com 20 neurônios.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A aplicação de PMC em simulações de motores CC apresenta alguns desafios. A escolha dos parâmetros da rede, como o número de camadas e neurônios, pode influenciar significativamente a precisão do modelo. Além disso, o tempo de treinamento pode ser um fator limitante, especialmente para problemas complexos. A Tabela 2 sintetiza os resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 2 – Resultados obtidos no estimador de velocidade sensorless

Topologia RNA	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
n. neurônios	15	17	20
Função de ativação	<i>Logística</i>	<i>Logística</i>	<i>Logística</i>
Taxa aprendizagem	0.008	0.008	0.008
Precisão	10^{-7}	10^{-7}	10^{-7}
Velocidade real (pu)	0,7000	0,7000	0,7000
Velocidade estimada (pu)	0,7005	0,7008	0,7003
Precisão de acerto (%)	99,95%	99,92%	99,97%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Outro desafio é a generalização do modelo, uma rede neural bem treinada deve ser capaz de generalizar bem para dados não vistos durante o treinamento. No entanto, pode ocorrer erros no qual a rede se ajusta excessivamente aos dados de treinamento, perdendo a capacidade de generalizar, podendo-se dizer que a rede não convergiu. Como forma de melhorar o comportamento da saída da rede, foi encontrado valores de ajuste da taxa de aprendizagem e precisão que retornasse uma curva próxima do esperado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do Perceptron Multicamadas (PMC) na simulação e estimação da velocidade de motores de corrente contínua (CC) demonstrou ser uma abordagem eficaz, capaz de prever o comportamento do motor com alta precisão. Nos experimentos realizados, com diferentes configurações de rede, obteve-se uma excelente precisão de estimativa, com erros muito pequenos, variando entre 0,0003 e 0,0008 pu, resultando em uma precisão de 99,95% a 99,92% dependendo da quantidade de neurônios na camada de entrada. Esses resultados confirmam a capacidade do PMC em modelar de forma precisa sistemas dinâmicos não lineares, como os motores CC, mesmo diante de variações de carga e tensão de operação.

A análise dos resultados evidenciou que o número de neurônios na camada de entrada impacta diretamente na precisão da rede. O ensaio com 20 neurônios na entrada obteve o menor erro (0,0003 pu), sugerindo que uma maior quantidade de neurônios melhora a capacidade de previsão da rede, embora com um pequeno aumento no tempo de treinamento. A comparação entre a saída esperada e a saída prevista pelas redes neurais, visível nos gráficos das simulações, revela que o modelo PMC é capaz de seguir de forma estável e precisa as flutuações de velocidade do motor, com apenas um pequeno desvio residual.

Entretanto, a implementação do PMC em sistemas de controle de motores CC, apesar de promissora, ainda apresenta desafios, como o risco de *overfitting* e a necessidade de um treinamento adequado para garantir a generalização do modelo. A regularização e a validação cruzada, aplicadas durante a fase de treinamento, se mostraram fundamentais para mitigar esses problemas e garantir a precisão do modelo para dados não vistos. Além disso, o tempo de treinamento pode ser um fator limitante em redes mais complexas, especialmente quando o número de neurônios e camadas aumenta.

Para futuras pesquisas, propõe-se a utilização do método *sensorless* para a implementação de controle em malha fechada de motores de corrente contínua (MCC). A proposta de um controle *sensorless* em malha fechada visa eliminar a necessidade de sensores de velocidade, utilizando a estimativa de velocidade gerada pela rede neural para ajustar a operação do motor em tempo real. Esse avanço pode tornar os sistemas de controle mais robustos e econômicos, ao mesmo tempo em que aumenta a flexibilidade na adaptação a diferentes condições operacionais.

Além disso, futuras investigações podem explorar a combinação de PMC com outras técnicas de otimização, como algoritmos evolutivos ou aprendizado profundo, para melhorar ainda mais a precisão e a eficiência dos modelos. A introdução de técnicas avançadas de treinamento e otimização de hiperparâmetros também pode contribuir para a superação das limitações atuais, tornando o modelo mais eficiente e aplicável em sistemas industriais reais.

Em resumo, o uso de PMC em simulações de motores CC representa um grande avanço na modelagem e controle de sistemas elétricos, com um potencial significativo para aplicações industriais. A combinação dessa abordagem com controle *sensorless* em malha fechada poderá trazer benefícios adicionais, criando soluções mais eficazes e de baixo custo para o controle de motores elétricos.

REFERÊNCIAS

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.** [s.l.] AMGH Editora, 2013.

FERREIRA, J. C. et al. Construção de um sistema didático para o ensino de lógica aplicada a processos de automação - BANCADA DIDÁTICA ELEVADORES. 2015.

FREITAS JUNIOR. L. C.; SILVA, R. S. **Máquinas elétricas.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018.

MOHAN, N. **Máquinas elétricas e acionamentos:** curso introdutório. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

OGATA. **Engenharia de controle moderno** 5a ed. São Paulo: Person, 2011.

HAGAN, M.T., DEMUTH, H.B., BEALE, M.H. **Neural Network Design.** PWS Publishing, 1996.

SRIVASTAVA, N. et al. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*, v. 15, p. 1929-1958, 2014.

HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning.** 2ª edição. Springer, 2009.

CARVALHO, Geraldo. **Máquinas elétrica teoria e ensaios.** 4. ed. São Paulo: Erica, 2011. 260 p

HAYKIN, Simon. **Redes neurais.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p

MIYAMOTO, R. K. **Notas de aula: Inteligência Artificial Aplicada em Automação.** Londrina: 2024.

MIYAMOTO, R. K. **Notas de aula: Modelagem de sistemas mecânicos rotacionais.** Londrina: 2023.

TAVARES, M. F. **Modelagem de sistemas dinâmicos.** 1.ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.

SILVA, Iyan Nunes; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUZINO, Rogerio Andrade. **Redes neurais artificiais.** 1. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 399 p



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

DESEMPENHO DE MÉTODOS SIMPLES DE PROTEÇÃO ANTICORROSIVA EM LIGAS METÁLICAS AUTOMOTIVAS

João Vitor Chendynski, Adriana Giseli Leite Carvalho e Daniel Almeida Colombo *

RESUMO

A corrosão de materiais metálicos é um dos principais desafios enfrentados pela indústria automotiva, comprometendo a durabilidade dos componentes e elevando os custos de manutenção. Dentre as estratégias de proteção, a aplicação de revestimentos protetivos destaca-se por sua viabilidade técnica e econômica. Este trabalho avaliou a eficácia de diferentes revestimentos na proteção contra a corrosão de chapas metálicas de alumínio e aço carbono (SAE 1020), com dimensões de 50x50 [mm], imersas em solução salina (NaCl a 5%) por sete dias. Foram analisados quatro tipos de revestimento: óleo lubrificante automotivo, cera automotiva, verniz comercial e tinta spray metálica comum. As amostras-controle, sem revestimento, apresentaram perdas de massa significativas: 50% para o aço carbono e 20% para o alumínio. Entre as amostras protegidas, a variação da perda de massa foi de 10% a 30% para o aço e de 3,2% a 13,3% para o alumínio. Os revestimentos mais eficazes foram o verniz comercial e, com desempenho semelhante, a tinta spray metálica. A inspeção visual indicou o início da corrosão nas chapas de aço já nas primeiras 24 horas de ensaio, enquanto nas chapas de alumínio os sinais visuais surgiram após 72 horas. Os resultados confirmam que a escolha adequada do revestimento pode retardar significativamente o avanço da corrosão, contribuindo para a maior vida útil dos materiais metálicos utilizados na indústria automotiva.

Palavras-chave: Corrosão metálica; Alumínio; Aço carbono; Revestimentos.

* Autor correspondente (e-mail): daniel.colombo@sistemafiep.org.br

1. INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo eletroquímico que leva à degradação de materiais metálicos, frequentemente resultando na formação de subprodutos indesejados, como óxidos, sulfetos e hidróxidos, que comprometem a integridade estrutural dos componentes e elevam os custos de manutenção (Viana et al., 2021). Segundo Silva (2023), trata-se de um problema técnico de grande impacto econômico e ambiental, cuja prevenção é essencial para garantir a segurança das estruturas, prolongar a vida útil dos materiais e contribuir para a sustentabilidade por meio da redução de resíduos e retrabalho.

As partículas geradas pelo processo corrosivo podem alterar a composição superficial dos metais, afetando seu desempenho, resistência mecânica e estética, além de possibilitar falhas críticas, como vazamentos. A corrosão afeta diversos metais utilizados na indústria, incluindo aço carbono, aço inoxidável, cobre, latão e alumínio, especialmente em situações de exposição contínua a agentes agressivos, como combustíveis automotivos (Muthuraman et al., 2022).

Cursaru et al. (2014) avaliaram a corrosão de cobre, alumínio e aço carbono expostos a combustíveis como diesel (B0), biodiesel (B100) e misturas (B20), observando maior deterioração no cobre, especialmente quando imerso em biodiesel puro por 3000 horas. Já o aço carbono, amplamente utilizado na indústria automotiva devido à sua boa resistência mecânica e baixo custo, apresentou desempenho intermediário.

O aço carbono é um material ferrítico que, embora não contenha cromo em níveis suficientes para torná-lo inoxidável, pode apresentar resistência moderada à corrosão, especialmente quando protegido por camadas passivadoras. Estima-se que cerca de 20% do aço produzido seja destinado à substituição de peças corroídas (Frauches-Santos et al., 2014). A aplicação de revestimentos protetivos, como ceras, lubrificantes, vernizes e tintas, é uma das estratégias mais utilizadas para retardar ou evitar o processo corrosivo (Viana, 2021).

Diante disso, a presente pesquisa tem como objetivo analisar a resistência à corrosão de chapas metálicas de alumínio e aço carbono submetidas à ação de solução salina, utilizando diferentes revestimentos protetivos: lubrificante automotivo, cera automotiva, verniz comercial e tinta spray metálica.

2. CONSIDERAÇÕES SOB OS ASPECTOS METODOLÓGICOS

3.

2.1 Preparo das amostras e aplicação dos revestimentos protetivos

Foram preparadas amostras metálicas a partir do corte de chapas de aço carbono (SAE 1020) e alumínio em dimensões padronizadas de 50x50 [mm], totalizando cinco amostras de cada material. As superfícies das chapas foram lixadas de forma leve e uniforme para padronização do acabamento superficial, seguidas de limpeza com thinner e posteriormente com água e detergente neutro, visando à remoção de impurezas, óleos e graxas. Após a secagem em temperatura ambiente, todas as amostras foram pesadas em balança de precisão, para registro da massa inicial antes da exposição ao meio corrosivo.

As amostras foram então divididas em cinco grupos, conforme o tipo de proteção superficial aplicada:

- Sem revestimento (grupo controle);
- Óleo lubrificante automotivo (Motul 3000 4T / SAE 20W-50);
- Cera automotiva (marca Freeway);
- Verniz spray comercial (Colorgin);
- Tinta spray metálica comum (Colorgin).

Os revestimentos foram aplicados sobre toda a superfície das chapas seguindo as instruções específicas de cada fabricante. O tempo de secagem foi respeitado conforme a especificação do produto utilizado.

2.2 Ensaio de Corrosão por Imersão em Solução Salina

Para a avaliação da resistência à corrosão, foi realizado um ensaio de imersão estática em solução salina. As amostras foram totalmente submersas em solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) a 5% p/p, sendo monitoradas visualmente em diferentes intervalos de tempo: 24 h, 48 h, 72 h e 168 h (1 semana).

Durante o experimento, as amostras foram fotografadas periodicamente para registro do aparecimento e evolução da corrosão. A observação permitiu comparar visualmente o desempenho dos diferentes tipos de proteção, incluindo o tempo estimado para o início da degradação visível em cada grupo.

Ao término do período de exposição, as amostras foram novamente limpas com thinner, água e detergente, e posteriormente secas à temperatura ambiente. Em seguida, foram pesadas para determinação da perda de massa em função do processo corrosivo.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos para as amostras após sete dias de exposição à solução salina, incluindo as massas iniciais, finais e os percentuais de perda de massa. Os resultados evidenciam o impacto da corrosão nas diferentes condições de proteção superficial aplicadas. As amostras-controle, sem qualquer tipo de revestimento, apresentaram as maiores perdas de massa: aproximadamente 50% para o aço carbono 1020 e 20% para o alumínio, indicando alta suscetibilidade à corrosão nesses materiais quando desprotegidos.

Nas amostras revestidas, o comportamento variou conforme o tipo de proteção aplicada. Para o aço 1020, as perdas de massa situaram-se entre 10% e 30%, enquanto para o alumínio, os valores variaram entre 3,2% e 13,3%. Em ambos os casos, os revestimentos que apresentaram melhor desempenho foram o verniz comercial e, com pequena diferença, a tinta spray metálica, demonstrando maior eficiência na contenção dos efeitos corrosivos.

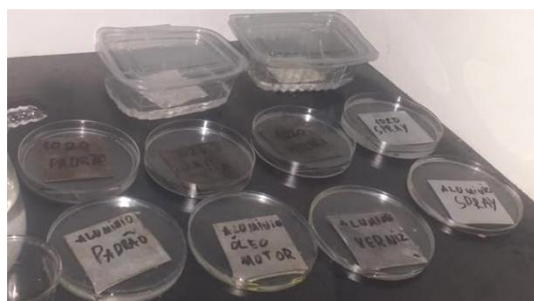
Tabela 1 - Perda de massa das amostras após sete dias de exposição à solução salina, com e sem proteção superficial.

	Massa inicial (g)		Massa final (g)		Perda de massa			
	Alumínio	Aço 1020	Alumínio	Aço 1020	Alumínio		Aço 1020	
					massa (g)	%	massa (g)	%
Controle	10	30	5	24	5	50	6	20
Chapa + cera	9	30	7	26	2	22,2	4	13,3
Chapa + óleo motor	10	31	7	28	3	30	3	9,7
Chapa + Verniz	10	31	9	30	1	10	1	3,2
Chapa + spray	9	30	8	29	1	11,1	1	3,3

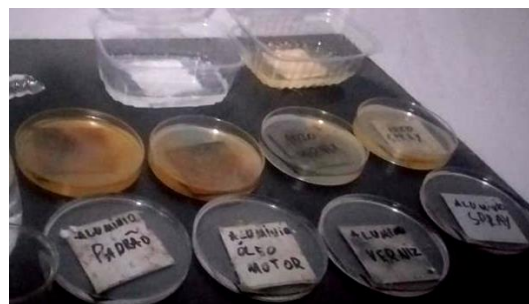
Fonte: Os autores.

A Figura 1 apresenta a evolução visual da corrosão nas amostras nos tempos de 0 h, 24 h, 48 h, 72 h e 168 h (1 semana) após o início do experimento. Observa-se que, já nas primeiras 24 horas, a corrosão foi visivelmente detectada nas chapas de aço 1020, enquanto as chapas de alumínio mantiveram-se visualmente inalteradas nesse mesmo intervalo. Os primeiros sinais de corrosão nas amostras de alumínio tornaram-se perceptíveis apenas após 72 horas de imersão na solução salina.

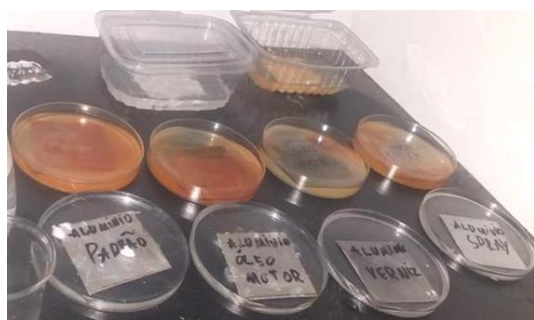
Figura 1. Corrosão das amostras em (a) 0h, (b) 24h, (c) 48h, (d) 72h e (e) 168 h (1 semana) do início do experimento.



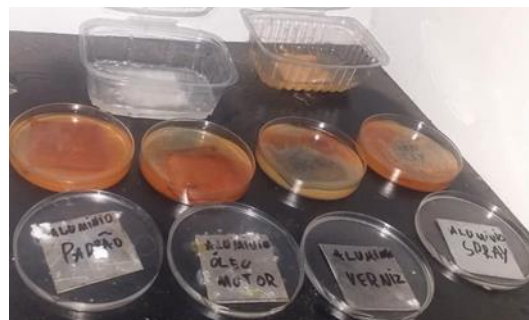
(a)



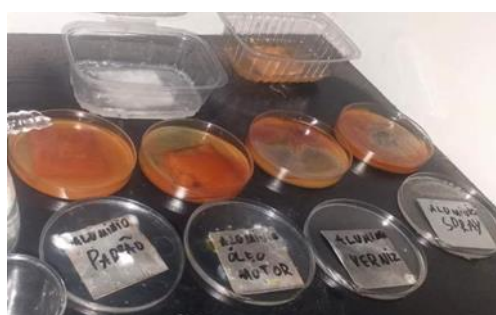
(b)



(c)



(d)



(e)

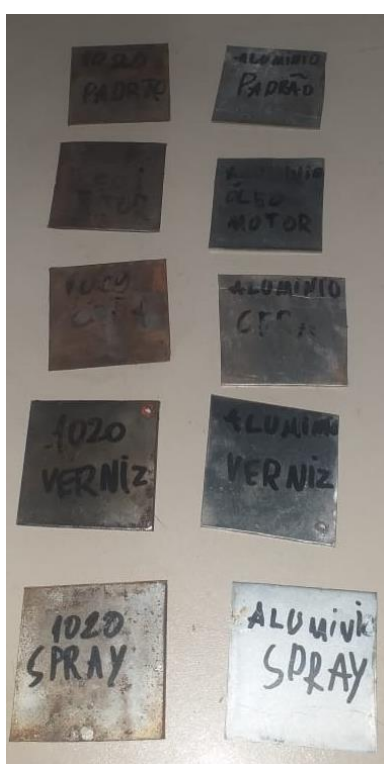
Fonte: Os autores.

Conforme observado nas imagens registradas ao longo do experimento, as chapas de alumínio apresentaram maior resistência à corrosão em comparação ao aço carbono. Esse comportamento pode ser atribuído à formação natural de uma camada passivadora na superfície do alumínio, resultante da reação do metal com o oxigênio do ambiente. Essa película é fina, contínua, não porosa e fortemente aderente à superfície, o que impede a progressão do ataque corrosivo.

A formação dessa camada passiva, no entanto, não depende exclusivamente do tipo de metal, mas também do meio em que ele está inserido. De modo geral, metais como o alumínio apresentam maior estabilidade em ambientes moderadamente agressivos, enquanto outros, como o ferro presente nos aços, formam produtos de oxidação com características distintas. No caso das amostras de aço carbono, observou-se a formação progressiva de uma camada de ferrugem, de aspecto poroso e não aderente, visível já nas primeiras 24 horas de exposição à

solução salina. Esse tipo de oxidação permite a penetração contínua do meio agressivo, acelerando o processo corrosivo e comprometendo a integridade do material. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 2, que evidencia o aspecto superficial das chapas após o ensaio.

Figura 2. Superfície das chapas após 72 h em solução salina: corrosão evidente no aço carbono e menor degradação no alumínio.



Fonte: Os autores.

As amostras-controle de aço 1020 e alumínio, sem qualquer tipo de proteção, apresentaram os maiores percentuais de perda de massa ao final do experimento, reforçando a importância dos revestimentos protetivos na mitigação da corrosão. As perdas variaram entre 3,2% e 30% nas amostras tratadas, demonstrando eficácia parcial dos materiais aplicados. Em ambos os metais avaliados, os revestimentos que

apresentaram melhor desempenho foram o verniz comercial e, com desempenho ligeiramente inferior, a tinta spray metálica.

A inspeção visual ao longo do ensaio permitiu observar a corrosão nas chapas de aço 1020 já após 24 horas de imersão, enquanto nos corpos de prova de alumínio os primeiros sinais de corrosão surgiram apenas após 72 horas. Esses resultados indicam que, mesmo sem revestimento, o alumínio apresentou maior resistência à solução salina a 5%, comportamento associado à formação espontânea de uma camada passivadora estável em sua superfície.

Portanto, conclui-se que tanto a escolha adequada do revestimento quanto o tipo de metal influenciam significativamente no desempenho frente à corrosão, sendo o alumínio o material mais resistente nas condições avaliadas.

REFERÊNCIAS

CURSARU, D.L.; BRANOIU, G.; RAMADAN I.; MICULESCU, F.; Degradation of automotive materials upon exposure to sunflower biodiesel. *Industrial Crops and Products*, v.54, p.149–158, 2014.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane et al. The corrosion and the anticorrosion agents. *Revista Virtual de Química*, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

MUTHURAMAN, V. Shenbaga et al. Progress on compatibility issues of alcohols on automotive materials: Kinetics, challenges and future prospects-a comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 162, p. 463-493, 2022.

PAGOTTO, Josias Falararo et al. Métodos de Proteção contra a Corrosão de ligas metálicas. São Carlos: Universidade de São Paulo, v. 18, 2013.

LOPES, Pamella Hayana Lima. Desempenho de tintas anticorrosivas em revestimento de aço-carbono SAE 1020. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Química Bacharelado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SECA, Ana ML. O maravilhoso mundo dos metais. Açoriano Oriental, p. 6-7, 2020.

SILVA, José Kleverton Pinheiro Medeiros da. Estudo de caso a respeito da corrosão encontrada em veículos automotores. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Campus de Russas, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2023.

VIANA, Stéfany Saraiva et al. Avaliação do pó da fibra da casca de coco verde como inibidor de corrosão natural do aço carbono em meio ácido. PANIAGUA, Cleiseano Emanuel da Silva (Org.). Coleção desafios das engenharias: engenharia química. Ponta Grossa, PR: Atena, 2021.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

A IMPORTÂNCIA DA EDUCAÇÃO FÍSICA NA EDUCAÇÃO EM TEMPO INTEGRAL (ETI) E O IMPACTO NO DESENVOLVIMENTO INTEGRAL DO ALUNO

Aline Maiane Fagundes, Cristiane Menino, Gabrieli Machado, Letícia Fiuza Dos Santos, Luana
Fernanda Campanharo, Felipe Augusto Fernandes Borges*

RESUMO

Este relato apresenta a implementação de um projeto de extensão voltado à Educação Física, desenvolvido com duas turmas participantes do programa de jornada ampliada em uma escola municipal de ensino fundamental. A iniciativa surgiu a partir da observação das dificuldades enfrentadas por alunos e professores da Educação em Tempo Integral (ETI), como fadiga, desmotivação e a carência de atividades extracurriculares diversificadas. Com o objetivo de promover a Educação Física como ferramenta para o desenvolvimento integral dos estudantes, foram organizadas atividades lúdicas e brincadeiras por meio de uma gincana, na qual as duas turmas atuaram como equipes adversárias. A fundamentação teórica apoia-se em autores como Vygotsky (1988) e Kishimoto (2011), que ressaltam a importância dos jogos e brincadeiras para o desenvolvimento psicossocial das crianças. A experiência envolveu 43 alunos do 5º ano e suas professoras, incentivando a cooperação, a socialização e a prática de atividades físicas. Os resultados evidenciaram a necessidade de maior valorização de atividades extracurriculares e de espaços além da sala de aula no contexto da ETI, destacando impactos positivos no engajamento e no bem-estar dos alunos, que passam grande parte do tempo na escola.

Palavras-chave: Educação Física; Jornada Ampliada; Projeto de Extensão; Educação em Tempo Integral (ETI).

ABSTRACT

This experience report describes the implementation of an extension project focused on Physical Education within the extended school day program of a municipal elementary school. The project emerged from observations of challenges faced by students and teachers in Full-Time Education (FTE), such as fatigue, demotivation, and a lack of extracurricular activities. Aiming to promote Physical Education as a tool for students' holistic development, the project organized playful activities and games through a sports competition between two classes as opposing teams. The theoretical framework draws on authors like Vygotsky (1988) and Kishimoto (2011), who emphasize the role of games and play in children's psychosocial development. The

* Autor correspondente (e-mail): felipe.borges@ifpr.edu.br

intervention involved 43 fifth-grade students and their teachers, fostering cooperation, socialization, and physical activity engagement. The results highlight the need to prioritize extracurricular and out-of-classroom activities in FTE programs, demonstrating positive impacts on student engagement and well-being, particularly for those spending extended hours in school.

Keywords: Physical Education; Extended School Day; Extension Project; Full-Time Education (FTE).

1. INTRODUÇÃO

O presente artigo tem como foco o estudo da importância da Educação Física no âmbito da Educação em Tempo Integral (ETI). O projeto desenvolvido, intitulado "A importância da Educação Física na ETI", teve como objetivo promover a Educação Física como ferramenta fundamental para o desenvolvimento integral dos alunos, com ênfase na análise do impacto dessa disciplina na educação integral dos estudantes de uma escola municipal localizada no município de Pitanga, Paraná.

Este relato de experiência fundamenta-se no ensino e na prática da Educação Física, considerando que esta prática pedagógica é essencial para o desenvolvimento social, emocional e motor, promovendo assim o desenvolvimento integral dos alunos no ambiente escolar. Durante a aplicação do projeto, adotou-se como metodologia de intervenção a realização de atividades voltadas para o desenvolvimento psicossocial dos alunos do 5º ano da jornada ampliada.

A intervenção teve início com uma explanação das pesquisadoras sobre a importância desse componente curricular, abordando tanto aspectos teóricos quanto práticos, destacando a relevância do conhecimento amplo sobre a temática e sua fundamental contribuição para o desenvolvimento humano.

Considerando o contexto da jornada ampliada, a Educação Física se configura como um componente importante para o desenvolvimento integral dos alunos, pois a implementação desse regime de ensino permitiu trabalhar essa disciplina com maior tempo e qualidade, promovendo saúde, bem-estar e desenvolvimento motor. Por meio deste artigo, será descrita a experiência vivenciada,

incluindo os desafios enfrentados, as limitações identificadas e os benefícios observados da Educação Física no contexto da jornada ampliada para os alunos.

2. RELATO DE PESQUISA E ELABORAÇÃO DO PROJETO

A proposta do projeto a ser apresentada a uma escola municipal, com as turmas do 5º ano do Ensino Fundamental que participam da jornada ampliada, consiste em uma tarde de lazer com jogos e brincadeiras. Essa iniciativa se justifica pela pouca desenvoltura dessas atividades durante o componente curricular, devido a diversas dificuldades enfrentadas. A partir de uma pesquisa realizada na instituição por uma das integrantes do projeto, constatou-se a falta de diversificação nas atividades da jornada ampliada. Os próprios alunos relataram sentir falta de recreações mais variadas, o que torna as aulas do período integral cansativas e monótonas.

A ideia proposta foi uma gincana com dinâmicas e premiações como incentivo para a participação dos alunos na data marcada. Esse projeto foi desenvolvido com base em pesquisas prévias e nos relatos dos estudantes e da equipe diretiva. Em conversa com a direção, foi destacada a importância de atividades diversificadas para os alunos, especialmente considerando a carência de mão de obra especializada e a falta de recursos materiais adequados, entre outras dificuldades cotidianas.

A pesquisa para a realização do projeto ocorreu em comum acordo com a direção da escola e dentro das normas institucionais, sendo aprovada pelos professores, pelo orientador do projeto e pelas docentes e discentes responsáveis. A aplicação do projeto contou com o acompanhamento dos professores das turmas, que prestaram todo o apoio necessário na organização dos alunos e do espaço. Foram realizadas diversas brincadeiras, como caixa misteriosa, corrida do saco, soletrando e "o que é, o que é", com o objetivo de demonstrar a importância desse componente curricular e mostrar que a didática aplicada vai além da prática convencional de esportes como o futebol nas aulas de Educação Física.

A construção deste projeto dialogou com referenciais teóricos que articulam ludicidade, desenvolvimento integral e educação física. Brougère (1998) fundamenta a concepção do jogo como atividade significativa, ressaltando seu papel na construção de aprendizagens sociais. Essa perspectiva embasou a estrutura da gincana, onde cada brincadeira foi planejada como situação problemática a ser resolvida coletivamente, promovendo não apenas a atividade física, mas também a negociação de regras e papéis sociais entre os participantes. Quando abordamos Santos (2012), vemos que este complementa esta visão ao demonstrar como jogos e brincadeiras integram desenvolvimento físico, cognitivo e afetivo. Seus estudos orientaram a seleção de atividades diversificadas na gincana, como a "caixa misteriosa" (estimulando a curiosidade) e a "corrida do saco" (trabalhando coordenação motora), sempre com foco na interação grupal. Essa abordagem foi articulada, também, com os princípios da BNCC (2018), particularmente no desenvolvimento das competências socioemocionais previstas para o Ensino Fundamental, garantindo que as atividades ultrapassassem o mero entretenimento.

A dimensão cultural do projeto foi fortalecida por Neira (2020), cuja abordagem da Educação Física como prática cultural fundamentou a inclusão de brincadeiras tradicionais adaptadas ao contexto local. Essa escolha permitiu valorizar o repertório dos alunos enquanto trabalhavam habilidades motoras. Na mesma direção, Snyders (1988) ofereceu o suporte teórico para compreender o clima de alegria durante as atividades não como elemento acessório, mas como componente essencial do processo educativo - percepção que se confirmou no entusiasmo e engajamento observados durante a execução.

3. RELATO DE INTERVENÇÕES

Com base nos fundamentos teóricos que embasaram o desenvolvimento deste projeto e nas análises referentes à sua aplicação prática, identificamos aspectos relevantes que serão descritos neste relato de intervenção.

Entre os referenciais teóricos que nortearam o projeto, destacamos Vygotsky (1988), cuja teoria afirma que os processos psicológicos se constroem a partir do

contexto sociocultural do indivíduo. Dessa forma, todo comportamento humano, incluindo as brincadeiras, resulta de processos sociais, envolvendo situações imaginárias, jogos e atividades participativas. Essa fundamentação foi crucial para integrar os alunos em um ambiente sociocultural favorável ao desenvolvimento de processos psicológicos ativos, permitindo a demonstração de suas interações sociais durante as dinâmicas coletivas e a expansão de suas capacidades cognitivas e motoras.

Outro referencial importante foi Kishimoto (2011), que destaca o jogo como elemento fundamental na construção humana, onde intenções e curiosidades estimulam processos criativos de transformação e reinterpretação da realidade. Durante a prática, observamos como essa perspectiva se relaciona com a Educação Física quando adequadamente planejada e executada. A participação dos alunos nas atividades permitiu visualizar como suas motivações e interesses influenciavam o desenvolvimento das dinâmicas, contribuindo para um processo ativo e criativo de aprendizagem.

Completando nossa fundamentação teórica, Santos (2012) ressalta que jogos e brincadeiras, além de oferecer situações de aprendizagem significativas, promovem o desenvolvimento físico, motor e a interação entre participantes. Ao relacionar essa perspectiva com a prática escolar, constatamos a relevante contribuição do projeto para o desenvolvimento integral dos alunos em aspectos físicos, motores e sociais.

A intervenção, que ocorreu em uma tarde do mês de maio de 2025, reuniu as turmas do 5º ano na quadra coberta da escola, divididas em equipes identificadas por fitas coloridas (azul e vermelha). A atividade iniciou com uma explicação das regras pelas extensionistas, enfatizando cooperação sobre competição. Na primeira etapa, o "Soletrando Cooperativo" apresentou palavras do cotidiano escolar permitindo, inclusive, que as equipes pedissem ajuda aos adversários.

Em seguida, a "Corrida do Saco" transformou-se em desafio integrado, pois também foi desenvolvido em equipes, o que facilitou a comunicação, a cooperação e a solidariedade entre os participantes.

O ápice ocorreu com a "Caixa Misteriosa", onde objetos variados foram explorados às cegas. Esta atividade envolveu surpresa e manifestações de suspense e alegria, sobretudo por se tratar de uma atividade bem diferente das normalmente desenvolvidas no âmbito escolar.

A dinâmica encerrou-se com o "O que é, o que é?", com várias perguntas e muita participação, sendo que as professoras notaram, inclusive, a participação inédita de alunos normalmente retraídos.

Quanto aos objetivos do projeto, podemos apontar que a aplicação alcançou os resultados esperados, possibilitando o desenvolvimento de nossas práticas docentes em instituições externas, conforme previsto em um projeto de extensão.

Embora não tenham sido aplicados instrumentos formais de mensuração, os benefícios da intervenção foram atestados por meio de: entrevistas informais com as professoras regentes, que relataram melhoria imediata no engajamento dos alunos e redução de conflitos em sala; observações sistemáticas dos extensionistas durante as atividades, que documentaram aumento significativo na cooperação entre pares; depoimentos espontâneos dos estudantes coletados pós-intervenção, como "Foi o melhor dia da escola este ano" e "Quero mais aulas assim". Esses registros, validados pela equipe pedagógica da escola, evidenciaram o alcance dos objetivos propostos sem necessidade de formalização quantitativa.

Durante a execução, enfrentamos desafios estruturais, particularmente com relação ao espaço físico. Nossa atividade dependia da quadra esportiva, que possui laterais abertas e acumula água em dias chuvosos - situação que ocorreu no dia da realização. No entanto, contamos com a colaboração da equipe escolar, que providenciou a secagem do espaço, permitindo a realização das atividades conforme planejado.

Nossa metodologia consistiu em uma gincana com diversas brincadeiras e desafios organizados em um cronograma específico. Apesar das condições climáticas adversas, conseguimos executar todas as atividades programadas dentro do tempo previsto, com a participação integral dos alunos.

A adesão dos estudantes superou nossas expectativas, com as duas turmas participando ativa e cooperativamente. As professoras regentes também se envolveram nas atividades, incentivando os alunos e promovendo a integração entre as classes, o que enriqueceu significativamente a experiência.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo narrou e analisou um projeto de extensão voltado ao desenvolvimento físico e social de alunos do Ensino Fundamental. Por meio de uma gincana educativa, buscou-se criar oportunidades para o aprimoramento de habilidades motoras e o estímulo à cooperação e interação social entre as crianças. A proposta fundamentou-se nos referenciais teóricos de Vygotsky (1988) e Kishimoto (2011), que destacam a relevância das atividades lúdicas e da socialização no processo de aprendizagem infantil.

A implementação do projeto demonstrou a eficácia das atividades propostas. A gincana, realizada com duas turmas do 5º ano, promoveu não apenas o desenvolvimento motor, mas também fortaleceu os vínculos interpessoais entre os alunos. A competição saudável e a necessidade de colaboração nas tarefas estimularam o trabalho em equipe, criando um ambiente de respeito mútuo e cooperação.

Entretanto, a execução enfrentou desafios estruturais. A infraestrutura da escola, embora adequada para a maioria das atividades, apresentou limitações em dias chuvosos, exigindo adaptações nas dinâmicas ao ar livre. Esses contratempos foram superados graças a um planejamento flexível que permitiu a realização das atividades em espaços alternativos, evidenciando a importância da capacidade de adaptação em projetos educacionais.

A participação da equipe pedagógica foi fundamental para o êxito da iniciativa. As docentes atuaram não apenas na organização, mas também como mediadoras das interações entre os alunos, contribuindo para um ambiente de aprendizagem

positivo. Seu envolvimento foi determinante para manter o engajamento dos estudantes durante todo o evento.

A adesão dos alunos superou as expectativas, com participação ativa e cooperativa em todas as atividades. Essa resposta entusiástica demonstrou como práticas lúdicas podem promover simultaneamente o desenvolvimento físico e o aprimoramento de habilidades socioemocionais.

Para nós, estudantes de Licenciatura em Pedagogia, esta experiência representou uma valiosa oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos teóricos adquiridos. A vivência permitiu compreender concretamente como atividades pedagógicas bem planejadas podem transformar o ambiente escolar e contribuir significativamente para o desenvolvimento educacional. A interação direta com turmas de tempo integral ampliou nossa compreensão sobre a importância do planejamento cuidadoso e da sensibilidade pedagógica.

Esta experiência propiciou uma reflexão profunda sobre o papel do educador, destacando a necessidade de atenção às diferentes realidades e contextos educacionais. Tal compreensão motivou a busca por estratégias inovadoras para tornar a prática pedagógica mais significativa e inclusiva, consolidando nossa formação profissional.

Os resultados indicam que o projeto alcançou seus objetivos, promovendo o desenvolvimento físico, a interação social e a formação cidadã. Atividades extracurriculares como esta fortalecem os laços escolares e oferecem aprendizagens que transcendem a sala de aula.

Como recomendações para futuras iniciativas, sugere-se:

- Diversificação das atividades para atender a diferentes interesses e necessidades
- Avaliação contínua da infraestrutura escolar
- Desenvolvimento de planos alternativos para condições climáticas adversas

Em conclusão, o estudo reforça a importância de integrar o lúdico ao processo

educacional, promovendo o desenvolvimento integral dos estudantes. Quando adequadamente planejadas e implementadas, tais práticas contribuem para a criação de ambientes escolares mais inclusivos, cooperativos e saudáveis.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2018.

BROUGÈRE, Gilles. **Jogo e educação**. Porto Alegre: Artmed, 1998.

FREIRE, João Batista. **Educação de corpo inteiro: teoria e prática da educação física**. São Paulo: Scipione, 1997.

HUIZINGA, Johan. **Homo Ludens: o jogo como elemento da cultura**. 8. ed. São Paulo: Perspectiva, 2018.

KISHIMOTO, Tizuko Morchida. **Jogos infantis: o jogo, a criança e a educação**. 16. ed. Petrópolis: Vozes, 2011.

LUCKESI, Cipriano Carlos. **Ludicidade e educação: para além do senso comum**. Petrópolis: Vozes, 2014.

NEIRA, Marcos Garcia. **Educação Física cultural: escritas sobre a prática**. Curitiba: CRV, 2020.

SANTOS, Santa Marli Pires dos (Org.). **O lúdico na formação do educador**. 7. ed. Petrópolis: Vozes, 2012.

SNYDERS, Georges. **A alegria na escola**. São Paulo: Manole, 1988.

VYGOTSKY, Lev Semenovitch. **A formação social da mente**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1988.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

MODA, SUSTENTABILIDADE E ENSINO SUPERIOR: conexões entre formação acadêmica e demandas do mercado

Jonas Eduardo Rocha*

RESUMO

O presente artigo aborda os desafios da sustentabilidade na indústria da moda a partir de um projeto prático desenvolvido pelos alunos do terceiro período do Curso Superior de Tecnologia em Design de Moda do Unisenai, em parceria com o Grupo Morena Rosa. A proposta integrou teoria e prática por meio da Jornada de Aprendizagem – Mercado e Sustentabilidade, que teve como objetivo o desenvolvimento de coleções de moda utilizando tecidos, aviamentos e resíduos têxteis parados em estoque. A metodologia envolveu pesquisa qualitativa e aplicada, com etapas descritivas, exploratórias e explicativas, articulando conceitos de design, marketing, sustentabilidade e planejamento de coleção. Como resultado, os alunos propuseram soluções criativas e viáveis para a reutilização de materiais e estratégias de comunicação de marca, fortalecendo sua formação profissional e contribuindo para práticas mais conscientes no setor. A iniciativa demonstrou a importância da integração entre academia e indústria para a construção de uma moda ética, inovadora e sustentável.

Palavras-chave:

Design de Moda; Sustentabilidade; Educação e Indústria; Moda Consciente; Projeto de Coleção; Grupo Morena Rosa; Resíduos Têxteis.

FASHION, SUSTAINABILITY AND HIGHER EDUCATION: connections between academic training and market demands

ABSTRACT

This article addresses the challenges of sustainability in the fashion industry through a practical project developed by third-semester students of the Fashion Design Technology Degree at Unisenai, in partnership with Grupo Morena Rosa. The initiative combined theory and practice through the Learning Journey – Market and Sustainability, which aimed to develop fashion collections using fabrics, trims, and textile waste from existing stock. The methodology involved qualitative and applied research, with descriptive, exploratory, and explanatory phases, integrating concepts

* Autor correspondente (e-mail): jonas.rocha@sistefafiep.org.br

of design, marketing, sustainability, and collection planning. As a result, students proposed creative and feasible solutions for material reuse and brand communication strategies, strengthening their professional development and contributing to more conscious practices in the fashion sector. The initiative demonstrated the importance of integrating academia and industry to build an ethical, innovative, and sustainable fashion future.

Keywords:

Fashion Design; Sustainability; Education and Industry; Conscious Fashion; Collection Project; Grupo Morena Rosa; Textile Waste.

1. INTRODUÇÃO

O ramo do vestuário configura um dos mais importantes setores da produção industrial brasileira e mundial. Ele movimenta a economia, sendo que o faturamento do setor no Brasil foi de R\$ 203,9 bilhões em 2023 e de R\$ 215 bilhões em 2024, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT). Além disso, de janeiro a outubro de 2024, foram criados 30,7 mil postos de trabalho, sendo 14,2 mil no segmento têxtil e 16,5 mil no de confecção, conforme aponta a ABIT. Todavia, essa produção em grande escala traz outros números elevados: estima-se que, atualmente, são descartados cerca de 92 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano no planeta; só no Brasil, são 4 milhões de toneladas anuais, de acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA).

Nesse sentido, é de suma importância que os profissionais da área da moda e vestuário busquem soluções para minimizar esse impacto gerado pelo setor. Assim, os cursos de formação na área – design de moda, cursos técnicos, profissionalizantes e afins – têm uma grande responsabilidade ao introduzir no mercado de trabalho profissionais qualificados e aptos a suprirem as necessidades do setor, visto que o vestuário encaixa-se nas necessidades básicas da população, porém capazes de aplicar soluções sustentáveis no processo de criação e produção de roupas.

Nessa perspectiva, o objetivo deste artigo é abordar o desafio da sustentabilidade na área de moda e vestuário, a partir da análise de projetos de

coleção desenvolvidos por alunos do terceiro período do Curso Superior de Tecnologia em Design de Moda Unisenai, no ano de 2025. O projeto foi desenvolvido em Parceria com o Grupo Morena Rosa, um dos maiores grupos de vestuário do país, na disciplina de Jornada de Aprendizagem.

O objetivo da disciplina é trazer aos alunos desafios reais propostos por empresas atuantes no mercado, com problemáticas diversas – como a relação entre mercado e sustentabilidade –, de modo a aproximar os estudantes do mercado de trabalho e dos desafios da profissão. Assim, projetos que envolvem problemáticas ligadas ao processo produtivo do setor auxiliam os alunos a aprimorarem seu senso crítico a respeito da criação de moda e a desenvolverem habilidades essenciais aos profissionais da área.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como base teórica para os projetos desenvolvidos, foram abordados conceitos relacionados às funções do design, com base em autores como Manzini (2015), Faerm (2012), Jones (2007), Pires (2008) e Sorger e Udale (2009). Também foi analisada a relação entre a indústria da moda e sustentabilidade, com base em Fletcher e Tham (2019), Cietta (2012), Solomon (2008), bem como gerenciamento de projetos e desenvolvimento de coleções a partir de contribuições de Valle (2011), Renfrew e Renfrew (2010), entre outros. Noções de marketing também foram analisadas, a partir de estudos de autores como Kotler e Keller (2012).

Qualquer projeto de design precisa estar pautado em três funções essenciais: prática, estética e simbólica. A função prática diz respeito ao objetivo básico para que um objeto é criado: no caso de uma peça de vestuário, por exemplo, seria cobrir o corpo e proteger do frio, vento, chuva, auxiliar no conforto térmico, entre outras. Já a função estética refere-se ao apelo visual do produto, como cores, texturas, formas, materiais, que chamam a atenção das pessoas e geram desejo, admiração, identificação e outras sensações. A função simbólica, por sua vez, é mais complexa e está atrelada ao significado social do objeto criado: uma peça de roupa pode

representar um grupo social e cultural, manifestar rebeldia, conservadorismo, liberdade feminina, empoderamento, por exemplo.

Nessa perspectiva, segundo Manzini (2015), o design na atualidade assume um papel importante na criação de soluções sustentáveis e socialmente responsáveis, ampliando seu alcance para além da materialidade dos objetos. Um projeto de design precisa organizar informações, resolver problemas de comunicação visual e funcionalidade, além de contribuir para a construção de identidades culturais e de mercado. Dessa forma, o design articula necessidades humanas, valores sociais e inovação, atuando como agente transformador na relação entre indivíduos, tecnologias e contextos sociais.

Nesse contexto, a relação entre a indústria da moda e a sustentabilidade é marcada por entraves, discussões e polêmicas envolvendo os modelos produtivos tradicionais, baseados no consumo acelerado – *fast fashion* –, e a necessidade de práticas produtivas e de consumo mais responsáveis ambiental e socialmente. Segundo Fletcher e Tham (2019), a sustentabilidade na moda exige uma reestruturação do sistema de produção que inclua desde o design até a cadeia de produção, distribuição e descarte, promovendo ciclos de vida mais longos para os produtos, o uso de materiais ecológicos e sustentáveis, bem como o respeito às condições de trabalho. Desse modo, a moda sustentável deve propor não apenas alternativas técnicas, mas também uma mudança cultural nos hábitos de consumo e na forma como entendemos o valor da roupa, integrando ética, estética e responsabilidade ambiental.

Ao criar um projeto de coleção, o designer de moda deve considerar uma série de elementos fundamentais que garantem coesão, identidade e viabilidade da proposta. Entre os principais aspectos estão a definição de um tema ou conceito central, a pesquisa de tendências e referências culturais, a escolha de materiais e cores, a modelagem e a compreensão do público-alvo.

Renfrew e Renfrew (2009) destacam que o desenvolvimento de uma coleção requer equilíbrio entre criatividade e planejamento técnico, sendo essencial articular inspiração, funcionalidade e apelo comercial. Dessa forma, o designer transforma

ideias abstratas em produtos concretos, alinhando expressão estética às demandas do mercado e às possibilidades produtivas.

Assim, para que o design seja criativo, eficiente e responsável, exige-se do designer um projeto de produto elaborado com bastante cuidado e atento às demandas contemporâneas de produtos que cumpram com suas funções práticas, estéticas e simbólicas, sem deixar a responsabilidade social e os pilares da sustentabilidade de lado.

O marketing de moda, nesse contexto, é essencial para posicionar marcas no mercado, construir valor simbólico e estabelecer conexões emocionais com os consumidores. Em um setor altamente competitivo e sensível a tendências, o marketing atua como ferramenta estratégica para comunicar identidade, criar desejo e influenciar decisões de compra. De acordo com contribuições de Kotler e Keller (2012), “o marketing é o processo de planejar e executar a concepção, a definição de preço, a promoção e a distribuição de ideias, bens e serviços para criar trocas que satisfaçam metas individuais e organizacionais”. Mais especificamente na moda, isso significa entender o comportamento do consumidor, definir o público-alvo e usar canais de comunicação e distribuição eficazes para fortalecer a presença da marca, destacar as ações sustentáveis e gerar valor no mercado, bem como admiração dos consumidores.

Nos projetos desenvolvidos com os alunos do terceiro período do curso de Design de Moda Unisenai, os conceitos de design, sustentabilidade e desenvolvimento de coleções foram trabalhados de forma teórica e, principalmente, prática, tendo como base o desafio proposto pelo Grupo Morena Rosa, cujo passo a passo será detalhado no item subsequente.

3. METODOLOGIA

2.1 Tipo de pesquisa

Para o trabalho realizado na Jornada de Aprendizagem do curso de Design de Moda Unisenai, com alunos do terceiro período, realizou-se a pesquisa qualitativa

quanto à abordagem, visto que realizaram pesquisas e analisaram informações referentes a público-alvo, tendências, concorrentes, materiais e referências.

No que se refere à natureza, considera-se que as pesquisas realizadas pelos alunos enquadram-se como aplicadas, uma vez que os dados obtidos nas pesquisas foram usados como ferramentas para a criação de um projeto de coleção de moda.

Quanto aos objetivos, houve etapas descritivas nas pesquisas, como nas etapas de descrição de público-alvo, de materiais usados, das tendências escolhidas e das soluções aplicadas à problemática. Ademais, a pesquisa também apresentou caráter exploratório, visto que os alunos tiveram os materiais – tecidos e aviamentos – em mãos para realizar experimentações antes de iniciar a etapa de criação. Por fim, por terem que apresentar suas soluções à banca avaliadora e elaborar um *book* de coleção com todas as etapas do projeto, a pesquisa também teve caráter explicativo.

Sobre os procedimentos, algumas etapas e ferramentas foram utilizadas: pesquisa bibliográfica sobre sustentabilidade, indústria da moda e planejamento de coleções; experimentos para testagem de materiais e soluções para a problemática de reaproveitamento de tecidos e aviamentos parados em estoque; pesquisa de campo, por meio de visitas em lojas da marca, concorrentes e visita técnica à fábrica do Grupo Morena Rosa; pesquisa etnográfica para análise de público-alvo, clientes e seguidores das marcas do grupo para elaboração de personas para a coleção; e registro documental, pois todo o processo de elaboração do projeto foi documentado em um *book* de coleção, disponibilizado à indústria parceira e também à comunidade acadêmica, além da realização de sessões de fotos com os protótipos de peças desenvolvidas nas coleções e *fashion films*.

2.2 Empresa parceira

O Grupo Morena Rosa foi fundado em 1993 em Cianorte-PR por Marco Franzato, que iniciou o empreendimento com apenas quatro máquinas de costura fabricando moletons para atacado.

Crescendo de forma exponencial, transformou-se em um dos maiores parques industriais de moda do país, com fábricas no Paraná, São Paulo e Rio Grande do Sul. Hoje, emprega entre 1.300 e 2.500 colaboradores.

A capacidade produtiva gira em torno de 2 milhões de peças por ano, distribuídas para mais de 6.000 multimarcas no Brasil, além de projetos de expansão via franquias e vendas em mais de 10 países.

O grupo reúne cinco marcas que atendem perfis femininos distintos e complementares: Morena Rosa (feminina, sensual, com *beachwear*, lingerie e acessórios); Maria.Valentina (elegante, para mulheres sofisticadas e seguras); Zinco (*streetwear* jovem com jeans e atitude); Lebôh, voltada à mulher urbana e autêntica; e Lódice, adquirida pelo grupo em 2019, para um público *premium* e cosmopolita. Juntas, essas marcas compõem um portfólio que abrange moda, calçados, *beachwear*, *sportswear* e acessórios, oferecendo coleções que se renovam com frequência e buscam traduzir a diversidade e a brasilidade da mulher contemporânea.

Em termos de missão, visão e valores, o Grupo Morena Rosa foca em “garantir sucesso aos clientes oferecendo produtos de qualidade, conforto e preço competitivo, gerando lucratividade por meio de colaboradores qualificados e motivados”.

Sua missão corporativa está intimamente ligada à responsabilidade social, evidenciada pelo Instituto Morena Rosa — criado em 2006 e com mais de 80 000 beneficiados até hoje — que promove projetos de saúde, educação, cultura e apoio aos colaboradores e comunidade. Os valores incluem propósito, criatividade, inovação, planejamento, gestão, sustentabilidade e compromisso com o desenvolvimento humano e satisfação de colaboradores, franqueados e clientes.

2.3 Jornadas de aprendizagem - Unisenai

As Jornadas de Aprendizagem foram instituídas pela Unisenai Paraná como uma forma de unir Indústria e academia, englobando todos os períodos de todos os cursos da universidade.

O objetivo das Jornadas de Aprendizagem é conectar os alunos com a Indústria por meio de problemáticas reais trazidas por essas empresas parceiras. A

partir dessas problemáticas, os alunos desenvolvem projetos que visam solucionar a problemática apresentada. Os projetos ocorrem de maneira interdisciplinar, com etapas sendo desenvolvidas em parceria com todas as demais disciplinas cursadas no semestre vigente.

Para cada semestre, a problemática gira em torno de um eixo temático, conforme as competências e habilidades trabalhadas nas disciplinas do semestre e também já trabalhadas em períodos anteriores (com exceção dos projetos desenvolvidos no primeiro semestre), de modo que os estudantes possam vivenciar, na prática, os conteúdos abordados nas aulas.

Ao final da Jornada de Aprendizagem, os alunos apresentam seus projetos à banca avaliadora, composta por professores do curso, professores convidados e integrantes da indústria parceira. Assim, conseguem ter um *feedback* dos docentes e também de um representante do mercado, o que extrapola o ambiente acadêmico e abre portas para os alunos adentrarem o mercado de trabalho ainda na graduação.

Figura 1 – Etapas da Jornada de Aprendizagem



Fonte: Unisenai

As etapas da Jornada de Aprendizagem são:

- Mãos na massa: apresentação do desafio que norteará as ações do projeto do semestre;
- Vivenciando a indústria: contato com a indústria para entender melhor o mercado e a problemática;
- Trocando ideias: pesquisas e atividades para identificar métodos e opções para solucionar a problemática;
- Hora de falar: elaboração das soluções e apresentação das ideias em diferentes formatos: bancas, vídeo e *slides*;
- Próximo desafio: entrega do projeto final, protótipo ou soluções referentes ao desafio proposto e orientações para os próximos projetos.

No que se refere ao Curso de Design de Moda, os alunos têm a possibilidade de participar de quatro Jornadas de Aprendizagem, uma vez que o curso tem duração de quatro semestres. No terceiro período do curso, a Jornada de Aprendizagem tem como eixo temático Mercado e Sustentabilidade, englobando as disciplinas de Processo Produtivo da Confecção, História da Arte e do Design, Marketing de Moda, Modelagem Informatizada, além de conhecimentos abordados nos períodos anteriores.

Assim, dado o eixo temático Mercado e Sustentabilidade, a escolha do Grupo Morena Rosa justifica-se pelo fato de que é uma das maiores empresas de moda do Brasil, com presença significativa no mercado nacional e internacional, além de fomentar iniciativas de uso consciente de materiais, descarte responsável de resíduos e propor parcerias com estudantes da área da moda para estudar estratégias de uso sustentável de materiais num setor que impacta tão fortemente o meio ambiente.

2.4 Desenvolvimento da Jornada e Aprendizagem: Mercado e Sustentabilidade

A Jornada de Aprendizagem – Mercado e Sustentabilidade, realizada pelos alunos do terceiro período do curso de Design de Moda Unisenai no primeiro

semestre de 2025, seguiu todas as etapas descritas no item 2.3, as quais serão detalhadas no item subsequente.

2.4.1 Mão na massa

Nas primeiras semanas de aula na disciplina de Jornada de Aprendizagem – Mercado e Sustentabilidade, os alunos foram orientados quanto à ementa da disciplina, conteúdos a serem abordados, competências a alcançar e habilidades a serem desenvolvidas.

O professor da disciplina explicou aos alunos a organização da jornada, as etapas a serem desenvolvidas, seus objetivos e resultados esperados.

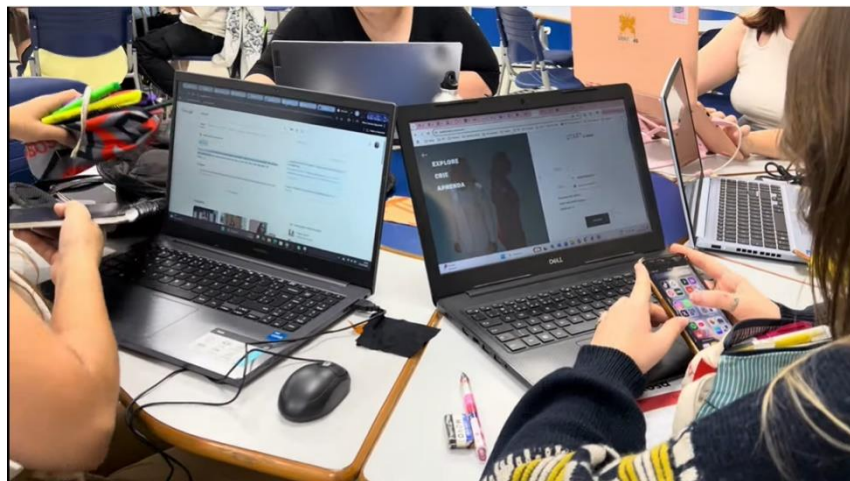
Também foi apresentada a empresa parceira do projeto – Grupo Morena Rosa – e a problemática proposta por ela: como utilizar tecidos, aviamentos e resíduos têxteis parados em estoque, bem como soluções de design e novas estratégias de mercado, para criar produtos inéditos que favoreçam a sustentabilidade ambiental e financeira da empresa?

A partir da problemática, foi apresentado o desafio a ser cumprido pelos alunos: desenvolver um mix de novos produtos de moda, a partir de tecidos, aviamentos e materiais fornecidos pela indústria, por meio de soluções de design que promovam a sustentabilidade, bem como propor estratégias de comunicação para a marca.

Os alunos foram divididos em cinco grupos e cada equipe ficou responsável por desenvolver um mix de coleção que propusesse uma solução para a problemática apresentada e cumprisse o desafio, tendo como base uma das cinco marcas que compõem o grupo: Lódice, Lebôh, Morena Rosa, Maria Valentina e Zinco.

Com as equipes divididas, eles colocaram as mãos na massa e realizaram pesquisas sobre o Grupo Morena Rosa, sobre a marca específica de seu grupo, nicho de mercado, concorrentes e público-alvo.

Figura 2 – Equipes desenvolvendo as pesquisas



Fonte: autor

2.4.2 Vivenciando a indústria

Para que pudessem ter um contato mais próximo com a empresa parceira, os estudantes participaram de uma reunião com a gerente de marketing do Grupo Morena Rosa, por meio da qual puderam conhecer mais sobre o histórico da empresa, valores, missão, visão, curiosidades sobre o processo produtivo, além de tirarem suas dúvidas.

Também realizaram uma visita técnica à fábrica do Grupo Morena Rosa em Cianorte – PR, onde viram de perto todos os setores – da criação e estilo à expedição. Essa visita foi essencial para os alunos perceberem, na prática, todas as etapas que compreendem a criação e confecção de uma peça de roupa em âmbito industrial, o que, certamente, auxiliou no momento de geração de alternativas para seus projetos.

Vale ressaltar que a visita técnica aconteceu como parte da disciplina de Jornada de Aprendizagem, mas de maneira interdisciplinar com Processo Produtivo da Confecção. Nesta disciplina, eles observaram e registraram falhas no sistema de produção da empresa, para pensarem em estratégias de melhoria no processo produtivo, que resultou em uma sugestão de aplicativo para auxiliar na solução dessas falhas identificadas.

Figura 3 – Vista técnica



Fonte: autor

2.4.3 Trocando ideias

Nesta etapa, as equipes pesquisaram *cases* de sustentabilidade aplicados no setor da moda para que entendessem o que já foi realizado nesse âmbito e pudessem, ao longo do projeto, aplicar novas soluções e propor possíveis soluções futuras.

Além disso, realizaram uma análise de seguidores das marcas para coletar informações como hábitos de consumo, marcas de preferência, comportamentos, interesses, entre outros dados relevantes. Esses dados foram discutidos pelas equipes que, em grupo, criaram uma persona que representasse a marca e direcionasse as etapas seguintes do projeto.

Em seguida, fizeram pesquisas de tendências de mercado em plataformas especializadas, como a Start by WGSN, que se conectassem com a proposta da marca, identidade e público-alvo. As tendências são essenciais para o direcionamento da geração de alternativas da coleção.

Como atividade interdisciplinar, em parceria com a matéria de Marketing de Moda, os estudantes analisaram com mais profundidade os canais de comunicação

das marcas, as estratégias de marketing e realizaram uma visita ao Clube Morena Rosa (loja que comercializa peças das marcas do grupo) e em lojas de concorrentes. Com os dados coletados nessa visita, puderam aplicar ideias e estratégias mais assertivas em seus projetos. Além disso, realizaram, na disciplina de Processo Produtivo da Confeção, um catálogo de formas, texturas e aviamentos para usar como ferramenta no momento de criação de suas coleções.

Na disciplina de História da Arte e do Design, foram instigados e desenvolverem um tema de coleção que estivesse de acordo com a identidade da marca e a persona por eles desenvolvida, com base nas pesquisas anteriores.

Com as ferramentas em mãos – pesquisa de mercado e concorrentes, painel de público-alvo, persona, dados da visita às lojas e catálogo de formas, texturas e aviamentos -, os grupos iniciaram a geração de alternativas de desenhos de suas coleções. Os alunos deveriam criar uma coleção primavera/verão com 25 a 26 peças, divididas em duas entradas, com base nos tecidos e materiais fornecidos pela empresa parceira. Cada integrante do grupo precisou propor, pelo menos, 10 opções de peças para compor a coleção. Na sequência, com orientação do professor da Jornada de Aprendizagem, fizeram a escolha final das peças que iriam compor o mix de coleção. Esse mix de produtos foi organizado da seguinte forma:

- Divisão de peças por tecido escolhido para a coleção;
- Divisão entre *tops* (peças de cima), *bottoms* (peças de baixo), *onepice* (peças únicas) e sobreposições;
- Divisão entre peças básicas, tendência e vanguarda;
- Cartela de tecidos e aviamentos usados;
- Soluções de sustentabilidade aplicadas em cada peça.

Na disciplina de Modelagem informatizada, eles realizaram os desenhos técnicos das peças da coleção e também as fichas técnicas das peças escolhidas como protótipo para confecção.

Além disso, os alunos precisaram elaborar croquis das peças confeccionadas, como estratégia de comunicação das ideias, com base em habilidades desenvolvidas

em semestres anteriores, principalmente da disciplina de Desenho de Moda (primeiro período).

Com as peças confeccionadas prontas, os alunos também realizaram um *lookbok* - ensaio fotográfico profissional - para apresentar à empresa os produtos resultantes. O resultado completo de todas essas etapas resultou em um *book* de coleção, disponibilizado à empresa parceira e também à comunidade acadêmica da instituição.

Figura 4 – Alunos realizando experimentações



Fonte: autor

2.4.4 Hora de falar

Nesta etapa, os alunos apresentaram seus projetos de coleção à banca avaliadora, composta por professores do curso de Design de Moda Unisenai, pela coordenadora de marketing do Grupo Morena Rosa e por estilistas das marcas pertencentes ao grupo.

Aqui, os alunos puderam apresentar as pesquisas realizadas, as ferramentas usadas, a coleção desenvolvida, as soluções de sustentabilidade aplicadas, as peças confeccionadas, o *lookbook* produzido e demais informações relevantes.

Figura 5 – Apresentações – bancas



Fonte: autor

2.4.5 Próximo desafio

Após a finalização dos projetos, os estudantes receberam o *feedback* da banca avaliadora e do professor de Jornada de Aprendizagem, com destaque aos pontos positivos e orientações sobre melhorias, bem como dicas de aperfeiçoamento para a próxima jornada.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os projetos de Jornada de Aprendizagem tiveram como resultado os *books* de coleção, com todas as ferramentas usadas, as etapas descritas e as criações apresentadas.

Os *books* configuram um material de grande valia para a empresa, pois compreendem todas as pesquisas feitas pelos alunos quanto ao público-alvo, às tendências, ao nicho de mercado e, principalmente, quanto às possibilidades de estratégias e soluções sustentáveis para a problemática apresentada.

Dentre as soluções aplicadas pelos alunos, destacam-se: usos de tecidos parados em estoque para criar novas peças; utilização de retalhos como composições, sobreposições, criação de texturas e forros de peças; aplicação de aviamentos enviados pela empresa em seus protótipos; uso de modelagens com

pouco e zero desperdício de tecido; uso de retalhos e sobras de tecido para confecção de acessórios – como brincos, bolsas e broches.

Figura 5 – Exemplos de soluções aplicadas pelos alunos



Fonte: autor

Figura 6 – Exemplos de possíveis soluções propostas pelos alunos



Fonte: autor

Dada a realidade atual da indústria da moda e confecção, em que o uso de recursos naturais, o descarte de materiais e o impacto ambiental são pontos de extrema atenção, projetos como esse são essenciais na formação de futuros profissionais, visto que estes deverão considerar, inevitavelmente, estratégias sustentáveis aplicáveis à sua profissão.

Portanto, a Jornada de Aprendizagem - Mercado e Sustentabilidade é um exemplo de como pensar a moda na atualidade, com suas demandas éticas, de uma forma não apenas teórica, mas prática, conectando acadêmicos e empresas existentes a partir de problemáticas reais e, de fato, pertinentes.

Figura 7 – Exemplo de peça confeccionada com reaproveitamento de tecidos



Fonte: autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Jornada de Aprendizagem – Mercado e Sustentabilidade, realizada pelos alunos do terceiro período do curso de Design de Moda do Unisenai, mostrou-se uma iniciativa relevante e transformadora na formação acadêmica e profissional dos estudantes. A partir de uma parceria com o Grupo Morena Rosa, foi possível conectar o ambiente educacional à realidade industrial, proporcionando uma experiência prática, multidisciplinar e alinhada às exigências contemporâneas do mercado de

moda, especialmente no que tange às questões de sustentabilidade. Os alunos puderam aplicar, de forma concreta, conhecimentos teóricos sobre design, marketing, modelagem e processos produtivos, ao mesmo tempo em que desenvolveram habilidades críticas, criativas e colaborativas.

A proposta de criar coleções utilizando tecidos, aviamentos e resíduos têxteis parados em estoque resultou em soluções originais e tecnicamente viáveis, que contribuem não apenas com o posicionamento sustentável da indústria parceira, mas também com o amadurecimento profissional dos estudantes.

Os projetos desenvolvidos apresentaram alternativas criativas para o reaproveitamento de materiais, redução de desperdícios e geração de valor simbólico por meio do design, evidenciando a importância da moda enquanto ferramenta de transformação social e ambiental. A análise de público, as estratégias de comunicação e o entendimento das marcas reforçaram o compromisso dos alunos com a realidade do setor.

Dessa forma, conclui-se que iniciativas como a Jornada de Aprendizagem são fundamentais para repensar o papel da educação em Design de Moda e promover o engajamento responsável com os desafios da indústria. Ao proporcionar aos alunos o contato direto com problemáticas reais, essas ações não apenas ampliam a visão de mundo dos futuros profissionais, mas também contribuem para a construção de uma moda mais consciente, ética e inovadora. A parceria com empresas como o Grupo Morena Rosa reafirma o potencial do diálogo entre academia e mercado como estratégia para a formação de designers comprometidos com um futuro mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ABIT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Indústria têxtil e de confecção aumentou a produção e gerou 30 mil empregos em 2024.** 2024. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/noticias/industria-textil-e-de-confeccao-aumentou-a-producao-e-gerou-30-mil-empregos-em-2024>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Na era da moda rápida e barata, 80% do descarte têxtil vira lixo.** 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2025/01/20/na-era-da-moda-rapida-e-barata-80-do-descarte-textil-vira-lixo/>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

CIETTA, E. **A revolução do fast-fashion:** estratégias e modelos organizativos para competir nas indústrias híbridas. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2012.

FAERM, S. **Curso de design de moda:** princípios, prática e técnicas. São Paulo: GGModa, 2012.

FLETCHER, K.; ST. PIERRE, L.; THAM, M. **Design and nature:** a partnership. London: Earthscan, 2019.

JONES, S. J. **Fashion design:** manual do estilista. São Paulo: Cosac Naify, 2007.

KOTLER, P.; KELLER, K. L. **Administração de marketing.** 14. ed. Tradução de Sônia Midori Yamamoto; revisão técnica de Edson Crescitelli. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

MANZINI, E. **Design, when everybody designs:** an introduction to design for social innovation. London: MIT Press, 2015.

PIRES, D. B. **Design de moda: olhares diversos.** São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2008.

RENFREW, E.; RENFREW, C. **Desenvolvendo uma coleção.** Porto Alegre: Bookman, 2010.

SOLOMON, M. R. **O comportamento do consumidor:** comprando, possuindo e sendo. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SORGER, R.; UDALE, J. **Fundamentos de design de moda.** Porto Alegre: Bookman, 2009.

VALLE, A. et al. **Fundamentos do gerenciamento de projetos.** Rio de Janeiro: FGV, 2011.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

CRIATIVIDADE E SUSTENTABILIDADE NO ENSINO DE MODA: reaproveitamento de tecidos de balões aposentados para desenvolvimento de projetos de coleção

Jonas Eduardo Rocha*

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados do projeto Jornada de Aprendizagem – Design e Criatividade, desenvolvido por alunos do primeiro período do Curso Superior de Tecnologia em Design de Moda da Unisenai, em parceria com a empresa Balloon & Co. O projeto teve como objetivo propor soluções sustentáveis para o reaproveitamento de materiais têxteis oriundos da indústria do balonismo, por meio da criação de coleções autorais de moda. A metodologia adotada foi qualitativa, aplicada, exploratória, descritiva e explicativa, envolvendo pesquisa de tendências, análise de público-alvo, experimentações técnicas e desenvolvimento de produtos. Com base em referenciais teóricos sobre design, sustentabilidade, marketing e desenvolvimento de coleções, os alunos criaram propostas alinhadas aos valores da marca parceira e às demandas contemporâneas do setor. Os resultados demonstram a importância de uma formação acadêmica pautada em desafios reais, que integre criatividade, responsabilidade social e inovação, aproximando universidade e indústria.

Palavras-chave:

Design de moda; Sustentabilidade; Reaproveitamento têxtil; Educação aplicada; Indústria criativa; Balloon & Co.

CREATIVITY AND SUSTAINABILITY IN FASHION EDUCATION: repurposing retired hot air balloon fabrics for fashion collection projects

ABSTRACT

This article presents the results of the Learning Journey – Design and Creativity project, developed by first-semester students of the Fashion Design Technology Program at Unisenai, in partnership with the company Balloon & Co. The project aimed to propose sustainable solutions for the reuse of textile materials from the hot air balloon industry through the creation of original fashion collections. The methodology

* Autor correspondente (e-mail): jonas.rocha@sistefafiep.org.br

adopted was qualitative, applied, exploratory, descriptive, and explanatory, involving trend research, target audience analysis, technical experimentation, and product development. Based on theoretical frameworks on design, sustainability, marketing, and collection planning, students created proposals aligned with the values of the partner brand and contemporary demands of the sector. The results highlight the importance of academic training grounded in real-world challenges, integrating creativity, social responsibility, and innovation while strengthening the connection between academia and industry.

Keywords:

Fashion design; Sustainability; Textile reuse; Applied education; Creative industry; Balloon & Co.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do vestuário ocupa uma posição de destaque na economia mundial e brasileira, sendo responsável por significativa movimentação financeira e geração de empregos. No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o setor faturou R\$ 203,9 bilhões em 2023 e R\$ 215 bilhões em 2024. No mesmo período, entre janeiro e outubro de 2024, foram criados 30,7 mil postos de trabalho: 14,2 mil no segmento têxtil e 16,5 mil no de confecção.

Apesar de seu impacto econômico positivo, a produção em larga escala do vestuário também está associada a graves impactos socioambientais. Segundo dados da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), cerca de 92 milhões de toneladas de resíduos têxteis são descartadas anualmente no mundo – sendo 4 milhões apenas no Brasil. Esses números revelam um dos principais desafios enfrentados pelo setor: conciliar desenvolvimento econômico com práticas sustentáveis.

Diante dessa realidade, é imprescindível que os profissionais da área da moda atuem de forma crítica e propositiva, contribuindo para a transformação dos processos produtivos. Para isso, torna-se fundamental que a formação desses profissionais esteja alinhada às exigências contemporâneas do mercado, incorporando princípios de sustentabilidade desde a etapa de criação até a execução

das peças. Cursos superiores, técnicos e profissionalizantes em moda têm, portanto, uma função estratégica: capacitar profissionais capazes de atender às necessidades básicas da população – como o vestuário –, ao mesmo tempo em que aplicam soluções criativas e sustentáveis em suas práticas, pensando e novos materiais e tecnologias.

É nesse contexto que se insere o projeto desenvolvido por alunos do primeiro período do Curso Superior de Tecnologia em Design de Moda da Unisenai, no ano de 2025. A atividade foi realizada em parceria com a empresa Balloon & Co, por meio da disciplina "Jornada de Aprendizagem". A proposta da disciplina consiste em apresentar aos estudantes desafios reais trazidos por empresas atuantes no mercado, promovendo a aproximação com o cotidiano da profissão e incentivando a resolução de problemáticas concretas, como a relação entre moda, design, criatividade e sustentabilidade.

Ao enfrentar desafios relacionados ao processo criativo, os alunos não apenas exercitam sua criatividade, como também desenvolvem competências essenciais ao exercício profissional responsável. Projetos como este contribuem para a formação de designers conscientes do impacto de suas decisões e preparados para propor soluções viáveis e inovadoras para um dos setores mais desafiadores e influentes da indústria contemporânea.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desenvolvimento de projetos de coleção no contexto da formação em Design de Moda exige a articulação entre teoria e prática, considerando aspectos funcionais, estéticos, simbólicos e mercadológicos. Nos projetos desenvolvidos pelos alunos do primeiro período do curso de Design de Moda da Unisenai, em parceria com a empresa Balloon & Co., essa abordagem integrada foi central para a construção de propostas criativas e adequadas à identidade da marca. Como base teórica, foram mobilizados autores que discutem as funções do design, a relação entre moda e

sustentabilidade, os processos de desenvolvimento de coleções e os fundamentos do marketing.

No que diz respeito ao design, qualquer projeto precisa se apoiar em três funções fundamentais: prática, estética e simbólica. A função prática refere-se ao uso e à funcionalidade do produto – no caso do vestuário, por exemplo, proteger o corpo, oferecer conforto térmico, adequar-se a condições climáticas. A função estética envolve aspectos visuais como cores, formas, texturas e materiais, responsáveis por gerar desejo, identificação ou admiração no consumidor. Já a função simbólica carrega os significados culturais e sociais da peça de roupa: ela pode representar pertencimento a um grupo, expressar ideologias, atitudes políticas ou aspectos identitários, como empoderamento e liberdade. Esses conceitos estão presentes nos estudos de autores como Manzini (2015), Faerm (2012), Jones (2007), Pires (2008) e Sorger e Udale (2009).

Segundo Manzini (2015), o design contemporâneo assume um papel que vai além da simples criação de objetos materiais: ele deve propor soluções socialmente responsáveis, resolver problemas de funcionalidade e comunicação, além de construir identidades – tanto culturais quanto mercadológicas. Nesse sentido, o design se posiciona como agente transformador, integrando inovação, valores sociais e necessidades humanas nos diversos contextos onde atua.

No campo da moda, essas funções do design se relacionam diretamente com os desafios da sustentabilidade. A indústria do vestuário, baseada em modelos de consumo acelerado como o *fast fashion*, enfrenta pressões para adotar práticas mais responsáveis. Como destacam Fletcher e Tham (2019), a sustentabilidade na moda requer mudanças sistêmicas, desde o design até os processos de produção, distribuição e descarte. Isso implica o uso de materiais ecológicos, valorização da durabilidade das peças, revisão das condições de trabalho e reconfiguração dos hábitos de consumo. Portanto, a moda sustentável demanda não apenas soluções técnicas, mas também transformações culturais.

Complementando essa visão, os projetos de coleção envolvem uma série de etapas que exigem planejamento estratégico e domínio técnico-criativo. A escolha de

um tema central, a pesquisa de tendências e referências culturais, a definição de materiais, cores, modelagens e o entendimento do público-alvo são aspectos fundamentais para garantir a coerência e a viabilidade das propostas. Renfrew e Renfrew (2009) ressaltam que o desenvolvimento de uma coleção exige equilíbrio entre criatividade e planejamento técnico, de modo que o designer consiga traduzir ideias em produtos concretos com apelo estético e comercial.

Outro aspecto essencial para o sucesso de um projeto de moda é o marketing. Em um setor altamente competitivo e sensível a tendências, o marketing de moda atua como ferramenta estratégica para posicionar marcas, comunicar identidades e criar conexões emocionais com os consumidores. De acordo com Kotler e Keller (2012), “o marketing é o processo de planejar e executar a concepção, a definição de preço, a promoção e a distribuição de ideias, bens e serviços para criar trocas que satisfaçam metas individuais e organizacionais.” No campo da moda, isso se traduz na compreensão do comportamento do consumidor, na definição clara do público-alvo e no uso eficaz dos canais de comunicação e distribuição. Além disso, o marketing pode ser uma via importante para comunicar as ações criativas e sustentáveis das marcas, gerando valor e admiração por parte dos consumidores.

Dessa forma, os projetos realizados pelos alunos da Unisenai buscaram aplicar, de forma integrada, os conceitos de design, criatividade, sustentabilidade e marketing. A experiência prática, aliada à fundamentação teórica consistente, proporcionou aos estudantes a vivência de desafios reais do mercado, por meio do problema proposto pela Grupo Balloon & Co.. O processo de desenvolvimento dessas coleções será detalhado no próximo item deste artigo.

3. METODOLOGIA

2.1 Tipo de pesquisa

O trabalho desenvolvido pelos alunos do primeiro período do curso de Design de Moda da Unisenai, no âmbito da disciplina Jornada de Aprendizagem, adotou uma

abordagem qualitativa, uma vez que envolveu a análise interpretativa de dados coletados por meio de pesquisas sobre público-alvo, tendências, concorrência, materiais e referências criativas. O objetivo foi compreender de forma aprofundada o contexto de atuação do projeto, bem como identificar soluções criativas e sustentáveis aplicáveis ao desenvolvimento de uma coleção de moda.

Quanto à natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois os dados obtidos foram utilizados diretamente como insumos para a criação de produtos – no caso, peças que compõem uma coleção de moda autoral. Essa característica evidencia a articulação entre teoria e prática, elemento essencial na formação em design.

Do ponto de vista dos objetivos, a pesquisa apresentou características descritivas, exploratórias e explicativas. Foi descritiva ao definir o perfil do público-alvo, os materiais utilizados, as tendências de moda e as soluções propostas para a problemática apresentada. Assumiu caráter exploratório no momento em que os alunos realizaram experimentações práticas com tecidos, aviamentos e materiais reaproveitados – como retalhos de confecção e materiais de balões aposentados –, a fim de investigar possibilidades técnicas e criativas antes da fase de criação. Finalmente, o caráter explicativo esteve presente na sistematização e apresentação das soluções à banca avaliadora, com a produção de um book de coleção contendo todas as etapas do projeto, justificativas conceituais e processos adotados.

Quanto aos procedimentos metodológicos, diversas ferramentas e estratégias foram empregadas ao longo do projeto. Dentre elas, destaca-se a pesquisa bibliográfica, utilizada para embasar teoricamente as discussões sobre design, reaproveitamento de materiais, planejamento de coleções e a indústria da moda. Também foram realizados experimentos práticos com os materiais disponíveis, testando combinações, aplicações e possibilidades de transformação. A pesquisa etnográfica foi aplicada na análise do público-alvo e de clientes e seguidores de marcas concorrentes, permitindo a elaboração de personas que orientaram as decisões criativas. Além disso, todo o processo foi sistematicamente registrado por meio de documentação técnica, resultando em um book de coleção disponibilizado

tanto à indústria parceira quanto à comunidade acadêmica, configurando-se como produto final da atividade.

2.2 Empresa parceira

A Balloon & Co. é uma marca que nasce da convergência entre grandes tendências globais nos setores da moda, turismo e sustentabilidade, propondo uma nova perspectiva sobre a indústria e sua cadeia de suprimentos. Inspirada no universo poético e aventureiro das viagens de balão, a marca incorpora em sua identidade os conceitos de mobilidade, leveza e inovação.

Seu diferencial está no reaproveitamento de materiais provenientes de balões de ar quente aposentados ou dos retalhos gerados durante sua fabricação. Esses materiais, que antes teriam como destino o descarte, são transformados em acessórios de moda – como bolsas e peças de vestuário – com alta durabilidade e resistência. Além do caráter funcional, os produtos carregam histórias e significados únicos, reforçados por um sistema de rastreabilidade que valoriza cada etapa da cadeia produtiva e promove transparência quanto à origem dos insumos.

A proposta da Balloon & Co. está alinhada com os valores da moda de luxo sustentável, segmento que cresce impulsionado por consumidores cada vez mais conscientes e exigentes quanto ao impacto ambiental e social das marcas. Paralelamente, o mercado de turismo de experiência – especialmente o segmento de balonismo – também apresenta projeções otimistas de expansão, reforçando o potencial simbólico e comercial da marca.

2.3 Jornadas de aprendizagem - Unisenai

As Jornadas de Aprendizagem foram instituídas pela Unisenai Paraná como uma estratégia inovadora para aproximar o ambiente acadêmico das demandas reais do setor produtivo. A proposta envolve todos os cursos e períodos da universidade,

promovendo a conexão direta entre os estudantes e a indústria por meio do desenvolvimento de projetos interdisciplinares.

O principal objetivo das Jornadas é proporcionar aos alunos a oportunidade de trabalhar com problemáticas reais apresentadas por empresas parceiras. A partir desses desafios concretos, os estudantes são estimulados a elaborar soluções criativas e viáveis, integrando conhecimentos adquiridos em diferentes disciplinas cursadas ao longo do semestre. A natureza interdisciplinar do projeto possibilita que as atividades da Jornada estejam articuladas com os conteúdos e competências desenvolvidos em sala de aula, fortalecendo o aprendizado prático e contextualizado.

A cada semestre, a problemática proposta gira em torno de um eixo temático central, definido a partir das competências previstas para o período vigente e também das habilidades já trabalhadas em etapas anteriores do curso — com exceção dos projetos do primeiro semestre, que são planejados para alunos em início de formação. Dessa forma, o percurso acadêmico dos estudantes é construído de maneira progressiva e integrada, promovendo a aplicação concreta dos conteúdos teóricos.

Ao final de cada Jornada, os projetos desenvolvidos são apresentados a uma banca avaliadora, composta por professores do curso, docentes convidados e representantes da empresa parceira. Essa dinâmica permite que os alunos recebam feedbacks qualificados, tanto do ponto de vista acadêmico quanto do mercado, ampliando sua visão profissional e favorecendo a inserção no mundo do trabalho ainda durante a graduação. As etapas da Jornada de Aprendizagem são:

- Mãos na massa: apresentação do desafio que norteará as ações do projeto do semestre;
- Vivenciando a indústria: contato com a indústria para entender melhor o mercado e a problemática;
- Trocando ideias: pesquisas e atividades para identificar métodos e opções para solucionar a problemática;

- Hora de falar: elaboração das soluções e apresentação das ideias em diferentes formatos: bancas, vídeo e *slides*;
- Próximo desafio: entrega do projeto final, protótipo ou soluções referentes ao desafio proposto e orientações para os próximos projetos.

Figura 1 – Etapas da Jornada de Aprendizagem



Fonte: Unisenai

No que se refere ao Curso de Design de Moda, os alunos têm a possibilidade de participar de quatro Jornadas de Aprendizagem, pois o curso tem duração de quatro semestres. No primeiro período do curso, a Jornada de Aprendizagem tem como eixo temático Design e Criatividade, englobando as disciplinas de Desenho de Moda, Desenho Técnico, Modelagem Industrial Plana e Oficina de Costura.

Assim, dado o eixo temático Design e Criatividade, a escolha da Balloon & Co. justifica-se pelo fato de que é uma marca ainda em desenvolvimento, com proposta de produtos criativos, com design funcional e utilitário para um público exigente, além de fomentar o uso consciente de materiais que seriam descartados pelo setor do balonismo.

2.4 Desenvolvimento da Jornada e Aprendizagem: Design e Criatividade

A Jornada de Aprendizagem – Design e Criatividade, realizada pelos alunos do primeiro período do curso de Design de Moda Unisenai no primeiro semestre de 2025, seguiu todas as etapas descritas no item 2.3, as quais serão detalhadas no item subsequente.

2.4.1 Mão na massa

Nas primeiras semanas de aula na disciplina de Jornada de Aprendizagem – Design e Criatividade, os alunos foram orientados quanto à ementa da disciplina, conteúdos a serem abordados, competências a alcançar e habilidades a serem desenvolvidas.

O professor da disciplina explicou aos alunos a organização da jornada, as etapas a serem desenvolvidas, seus objetivos e resultados esperados.

Também foi apresentada a empresa parceira do projeto – Balloon & Co. – e a problemática proposta por ela: como utilizar materiais têxteis provenientes de descarte da indústria para desenvolver produtos de moda que aliem design, usabilidade e sustentabilidade, e atendam ao perfil do público-alvo da marca?

A partir da problemática, foi apresentado o desafio a ser cumprido pelos alunos: desenvolver um mix de novos produtos, incluindo peças de vestuário e acessórios, adequados às características dos materiais fornecidos pela indústria, a partir de soluções de design que promovam a sustentabilidade, bem como propor estratégias de comunicação para a marca.

Os alunos foram divididos em seis grupos e cada equipe ficou responsável por desenvolver um mix de coleção que propusesse uma solução para a problemática apresentada e cumprisse o desafio.

Com as equipes divididas, eles colocaram as mãos na massa e realizaram pesquisas sobre o setor do balonismo, sobre o material utilizado na sua fabricação, sobre o nicho de mercado, concorrentes e público-alvo.

Figura 2 – Equipes desenvolvendo as pesquisas



Fonte: autor

2.4.2 Vivenciando a indústria

Para que pudessem ter um contato mais próximo com a empresa parceira, os estudantes participaram de uma reunião com representantes da Balloon & Co., por meio da qual puderam conhecer mais sobre a empresa, valores, missão, visão, curiosidades sobre o nicho de mercado e materiais, além de tirarem suas dúvidas. Também tiveram contato com amostras de tecidos e outros materiais usados na produção de balões de ar quente.

Além disso, tiveram a possibilidade de abrir um balão aposentado, providenciado pela empresa parceira, para que coletassem materiais para experimentações e confecção de futuros protótipos, acompanhados de uma representante da Balloon & Co.

Figura 3 – Bate-papo com a empresa e análise de materiais



Fonte: autor

2.4.3 Trocando ideias

Nesta fase do projeto, as equipes iniciaram o processo de criação com uma pesquisa aprofundada sobre empresas que reutilizam materiais da indústria para a confecção de roupas e acessórios. Foram investigados casos que utilizam insumos como lonas de caminhão, nylon proveniente de equipamentos de acampamento, guarda-chuvas e outros materiais reaproveitados, reforçando o vínculo entre sustentabilidade e inovação no design.

Paralelamente, os grupos realizaram uma análise do público-alvo a partir dos seguidores de marcas similares à Balloon & Co., com o objetivo de identificar hábitos de consumo, marcas preferidas, comportamentos, valores e interesses do nicho. Com

base nessa análise, cada grupo desenvolveu duas personas representativas da marca – uma voltada ao mercado nacional e outra ao mercado internacional. Essas personas serviram como guia para orientar as decisões estéticas, funcionais e conceituais da coleção.

A etapa seguinte consistiu em uma pesquisa de tendências de mercado, realizada em plataformas especializadas como a Start by WGSN. A intenção foi alinhar as tendências emergentes com os valores da marca, a identidade visual e o perfil do público-alvo previamente estabelecido, fortalecendo a coerência e a atualidade da proposta de coleção.

Na disciplina de Jornada de Aprendizagem, os alunos foram desafiados a desenvolver um tema de coleção alinhado à identidade da Balloon & Co. e às personas construídas.

A partir das pesquisas realizadas, os grupos passaram à fase de geração de alternativas, onde cada integrante deveria criar pelo menos 10 propostas de peças de vestuário e 2 de acessórios, com base nos materiais disponíveis. As coleções deveriam conter de 10 a 12 peças de vestuário e 3 a 5 acessórios.

Como atividade interdisciplinar, os conhecimentos teóricos foram aplicados em aulas práticas das disciplinas de Modelagem Industrial Plana e Oficina de Costura, nas quais os alunos realizaram experimentações com os materiais fornecidos pela empresa parceira. Testaram modelagens, encaixes, tipos de costuras e o uso de diferentes maquinários, sempre com o suporte da professora responsável. Essa etapa foi essencial para que compreendessem as características dos materiais reaproveitados e explorassem soluções criativas e viáveis tecnicamente.

Com apoio e orientação do professor da disciplina, os grupos realizaram a seleção final das peças que integrariam o mix de produtos da coleção. Essa curadoria levou em conta critérios como originalidade, viabilidade técnica, harmonia com o conceito da marca e aplicabilidade dos materiais sustentáveis.

O mix de produtos final foi estruturado da seguinte forma:

- Divisão de peças por tecido escolhido para a coleção;

- Divisão entre *tops* (peças de cima), *bottoms* (peças de baixo), *onepice* (peças únicas) e sobreposições;
- Divisão entre peças básicas, tendência e vanguarda;
- Cartela de tecidos e aviamentos usados;
- Soluções de design aplicadas em cada peça.

Na disciplina de Desenho técnico, eles realizaram os desenhos técnicos das peças da coleção e também as fichas técnicas das peças escolhidas como protótipo para confecção.

Além disso, os alunos precisaram elaborar croquis das peças confeccionadas, como estratégia de comunicação das ideias, com base em habilidades desenvolvidas na disciplina de Desenho de Moda.

O resultado completo de todas essas etapas resultou em um *book* de coleção, disponibilizado à empresa parceira e também à comunidade acadêmica da instituição.

Figura 4 – Alunos realizando experimentações



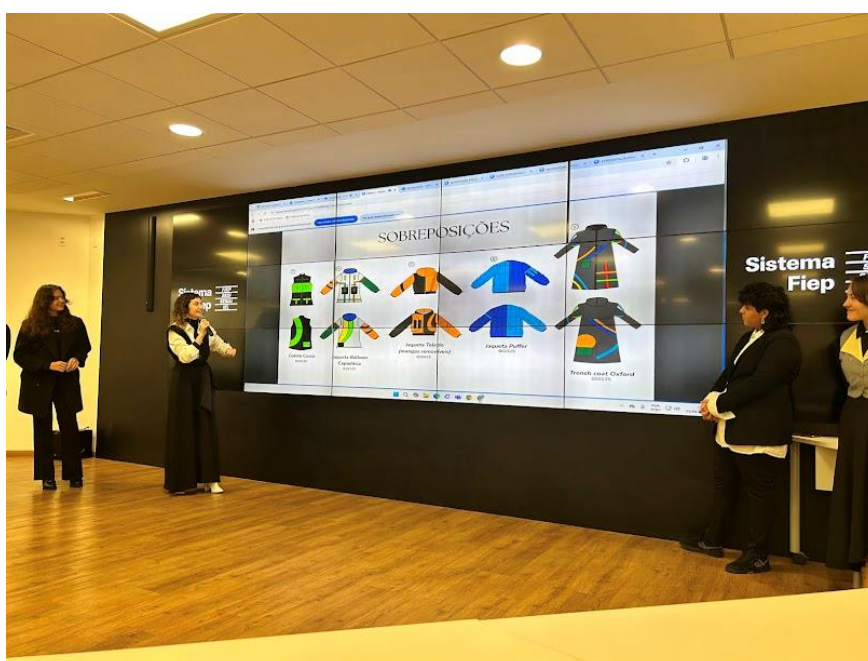
Fonte: autor

2.4.4 Hora de falar

Nesta etapa, os alunos apresentaram seus projetos de coleção à banca avaliadora, composta por professores do curso de Design de Moda Unisenai e pelos fundadores da Balloon & Co.

Aqui, os alunos puderam apresentar as pesquisas realizadas, as ferramentas usadas, a coleção desenvolvida, as soluções de design aplicadas e demais informações relevantes.

Figura 5 – Apresentações – bancas



Fonte: autor

2.4.5 Próximo desafio

Após a finalização dos projetos, os estudantes receberam o *feedback* da banca avaliadora e do professor de Jornada de Aprendizagem, com destaque aos pontos positivos e orientações sobre melhorias, bem como dicas de aperfeiçoamento para a próxima jornada.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como resultado final da Jornada de Aprendizagem, os alunos elaboraram *books* de coleção que reuniram todas as etapas do projeto, desde as pesquisas iniciais até as criações finais. Esses materiais documentam de forma sistemática o processo de desenvolvimento das coleções, incluindo as ferramentas utilizadas, as análises realizadas e as decisões criativas adotadas ao longo do percurso.

Os *books* configuram-se como instrumentos valiosos para a empresa parceira, pois consolidam informações relevantes sobre o público-alvo, tendências de mercado, nichos específicos e, sobretudo, apresentam estratégias e soluções inovadoras de design aplicáveis à problemática proposta. Servem tanto como fonte de inspiração quanto como referência técnica e conceitual para futuros projetos da marca.

Dentre as soluções desenvolvidas pelos alunos, destacam-se:

- Reaproveitamento de tecidos de balões aposentados para a criação de peças de vestuário e acessórios, conferindo originalidade, resistência e forte apelo simbólico aos produtos;
- Utilização de retalhos têxteis como elemento de composição visual, criando sobreposições, texturas, forros e acabamentos com identidade própria;
- Aplicação criativa de materiais fornecidos pela empresa parceira, como alças, mantas térmicas, retalhos de couro e outros insumos, incorporando-os de forma funcional e estética nas peças;
- Exploração de modelagens inteligentes, com encaixes que maximizam o aproveitamento dos tecidos e reduzem o desperdício de material;
- Desenvolvimento de acessórios sustentáveis (como brincos, bolsas e broches), a partir de sobras de tecidos e pequenos retalhos, promovendo o reaproveitamento total dos recursos disponíveis.






Essas soluções demonstram a capacidade dos estudantes de integrar pesquisa, técnica e criatividade com foco em design sustentável, alinhando-se aos

valores e necessidades do mercado contemporâneo. Além disso, reforçam o compromisso da formação acadêmica em moda com a inovação, a responsabilidade socioambiental e a conexão com desafios reais da indústria.

Figura 5 – Exemplos de soluções aplicadas pelos alunos

Problemática:
Como utilizar materiais têxteis provenientes de descarte da indústria para desenvolver produtos de moda que aliem design, usabilidade e sustentabilidade, e atendam ao perfil do público-alvo da marca?

SOLUÇÕES APLICADAS:

				
Bolsos removíveis e detalhes intercambiáveis, garantindo personalização e multifuncionalidade.	Desenvolvimento de peças com cortes retos, amplos e trançados maximizando o aproveitamento de materiais e reduzindo desperdícios.	Acessórios feitos de sobras do balão, distribuídos como brindes para engajar o público e reforçar a identidade da marca.	Uso de sobras de fitas como alças ajustáveis em bolsas e mochilas, ou como detalhes decorativos e funcionais em roupas.	Aproveitamento do tecido de balão descartado para desenvolver peças de moda funcionais, valorizando sua resistência e durabilidade.

Fonte: autor

Figura 6 – Exemplos de produtos criados pelos alunos

COLOR STORY 2



Macacão Liberdade BC0030P

Sala Incandescência BC005BT

Blusa Envolvimento BC006TP

Broche Flutuar BC0015ACR

Jaqueta Sopro BC004TP

Chapéu Céu BC0013ACR

Calça Radiante BC008TP

Macacão Atmosfera BC0070P

Fonte: autor

Diante do cenário atual da indústria da moda e da confecção — marcado pelo uso intensivo de recursos naturais, altos índices de descarte de materiais e significativo impacto ambiental — torna-se imprescindível repensar os processos produtivos à luz da sustentabilidade. Nesse contexto, projetos como o desenvolvido na Jornada de Aprendizagem – Design e Criatividade são fundamentais para a formação de profissionais conscientes, criativos e alinhados às demandas contemporâneas do setor.

A atividade permitiu que os alunos compreendessem, na prática, a complexidade de desenvolver soluções que integrem estética, funcionalidade e responsabilidade socioambiental. Ao trabalhar com problemáticas reais, trazidas por empresas atuantes no mercado, os estudantes foram desafiados a aplicar seus conhecimentos de forma estratégica, colaborativa e inovadora, experimentando alternativas sustentáveis viáveis dentro do contexto profissional.

Assim, a Jornada se consolida como um exemplo pedagógico eficaz de como pensar e fazer moda hoje, indo além da teoria e promovendo o encontro entre universidade e indústria. Ao aproximar os alunos de desafios autênticos, contribui para a formação de designers mais preparados para atuar com ética, criatividade e compromisso diante das transformações e exigências do setor.

Figura 7 – Exemplo de peça criada pelos alunos



Fonte: autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização da Jornada de Aprendizagem – Design e Criatividade com os alunos do primeiro período do curso de Design de Moda da Unisenai, em parceria com a empresa Balloon & Co., representou uma experiência significativa de articulação entre ensino, prática profissional e compromisso socioambiental. O projeto permitiu aos estudantes vivenciar de forma concreta os desafios da indústria da moda, ao mesmo tempo em que desenvolveram competências técnicas, criativas e reflexivas fundamentais à formação do designer contemporâneo.

Diante dos impactos ambientais gerados pela cadeia produtiva do vestuário, torna-se cada vez mais urgente que os futuros profissionais do setor estejam aptos a propor soluções criativas, sustentáveis e alinhadas às exigências de um mercado em constante transformação. O contato com materiais reaproveitados, o diálogo com a empresa parceira e a experimentação prática de processos e técnicas de modelagem e costura contribuíram para que os alunos compreendessem, de forma crítica e propositiva, as possibilidades de atuação responsável no campo do design de moda.

Além disso, o formato da Jornada de Aprendizagem se mostrou eficaz ao promover uma abordagem interdisciplinar e colaborativa, conectando teoria e prática, universidade e indústria, criatividade e estratégia. O envolvimento dos alunos em todas as etapas do processo – desde a pesquisa inicial até a apresentação das soluções desenvolvidas – proporcionou não apenas a aplicação de conhecimentos adquiridos, mas também o desenvolvimento de habilidades como trabalho em equipe, comunicação, análise de tendências e resolução de problemas reais.

Como resultado, foram desenvolvidas coleções autorais coerentes com o perfil da marca Balloon & Co., com soluções estéticas e funcionais inovadoras, reforçando o potencial do design como agente transformador. Os books de coleção entregues pelos alunos materializam não apenas suas ideias e criações, mas também um novo olhar sobre o fazer moda – mais consciente, mais conectado com as urgências sociais e ambientais, e mais preparado para os desafios do presente e do futuro.

Dessa forma, a experiência aqui relatada confirma a relevância pedagógica das Jornadas de Aprendizagem como estratégia de ensino voltada à formação integral do estudante, capaz de prepará-lo para uma atuação crítica, ética e criativa na indústria da moda.

REFERÊNCIAS

ABIT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. **Indústria têxtil e de confecção aumentou a produção e gerou 30 mil empregos em 2024**. 2024. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/noticias/industria-textil-e-de-confeccao-aumentou-a-producao-e-gerou-30-mil-empregos-em-2024>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

ABREMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Na era da moda rápida e barata, 80% do descarte têxtil vira lixo**. 2025. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/2025/01/20/na-era-da-moda-rapida-e-barata-80-do-descarte-textil-vira-lixo/>>. Acesso em: 27 jun. 2025.

CIETTA, E. **A revolução do fast-fashion**: estratégias e modelos organizativos para competir nas indústrias híbridas. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2012.

FAERM, S. **Curso de design de moda**: princípios, prática e técnicas. São Paulo: GGModa, 2012.

FLETCHER, K.; ST. PIERRE, L.; THAM, M. **Design and nature**: a partnership. London: Earthscan, 2019.

JONES, S. J. **Fashion design**: manual do estilista. São Paulo: Cosac Naify, 2007.

KOTLER, P.; KELLER, K. L. **Administração de marketing**. 14. ed. Tradução de Sônia Midori Yamamoto; revisão técnica de Edson Crescitelli. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

MANZINI, E. **Design, when everybody designs**: an introduction to design for social innovation. London: MIT Press, 2015.

PIRES, D. B. **Design de moda: olhares diversos**. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2008.

RENFREW, E.; RENFREW, C. **Desenvolvendo uma coleção**. Porto Alegre: Bookman, 2010.

SOLOMON, M. R. **O comportamento do consumidor**: comprando, possuindo e sendo. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SORGER, R.; UDALE, J. **Fundamentos de design de moda**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

VALLE, A. et al. **Fundamentos do gerenciamento de projetos**. Rio de Janeiro: FGV, 2011.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]

SHREDDER DESAGUADOR

Caroline Damaceno, Lucas Fernando Alves e Angelo Rodrigo Ruth*

RESUMO

Este artigo propõe o desenvolvimento de um shredder desaguador, focado na aplicação alimentícia, como uma solução para reduzir o desperdício de energia no processo de extração de adubo. O dispositivo proposto combina as funções de trituração e desidratação dos alimentos em uma única máquina, visando tornar o processo mais eficiente e sustentável. Essa abordagem busca otimizar a gestão de resíduos alimentares, promovendo a sustentabilidade ambiental na indústria alimentícia e em setores relacionados. Ao integrar as etapas de trituração e desidratação, o shredder desaguador proposto pode contribuir para uma extração de adubo mais eficaz, reduzindo o consumo de energia e minimizando o impacto ambiental.

Palavras-chave: shredder desaguador, sustentabilidade, extração de adubo, gestão de resíduos, indústria alimentícia.

DEWATER SHREDDER

ABSTRACT

This article proposes the development of a dewatering shredder, focused on food applications, as a solution to reduce energy waste in the compost extraction process. The proposed device combines the functions of shredding and dehydrating food in a single machine, aiming to make the process more efficient and sustainable. This approach seeks to optimize food waste management, promoting environmental sustainability in the food industry and related sectors. By integrating the shredding and dehydrating stages, the proposed dewatering shredder can contribute to a more effective compost extraction, reducing energy consumption and minimizing environmental impact.

Key words: dewatering shredder, sustainability, compost extraction, waste management, food industry.

* Autor correspondente (e-mail): angelo.rodrico@sistemapiep.org.br

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas sustentáveis e a necessidade de gestão eficiente de resíduos industriais têm intensificado o interesse pelo desenvolvimento de tecnologias que otimizem processos produtivos. Nos últimos anos, trituradores industriais têm se tornado elementos essenciais na conversão de materiais variados, impactando diretamente a eficiência operacional, os custos de produção e a redução do impacto ambiental. Nesse contexto, a importância de dispositivos que integrem múltiplas funções, como trituração e desidratação, torna-se evidente, especialmente em setores críticos como a indústria alimentícia. Este estudo aborda a proposta de confecção de um shredder desaguador, projetado para aprimorar o processo de extração de adubo a partir de resíduos alimentares. O dispositivo proposto tem como objetivo combinar a trituração dos alimentos com a separação eficiente de líquidos, otimizando as etapas subsequentes de compostagem. Ao desidratar os resíduos antes do processo de compostagem, busca-se acelerar a decomposição e maximizar a eficiência da produção de adubo, contribuindo assim para uma maior sustentabilidade na gestão de resíduos. Além de aprofundar o conhecimento teórico sobre trituradores industriais, este trabalho propõe soluções práticas para desafios específicos enfrentados pela indústria alimentícia, com implicações positivas para a sustentabilidade e a eficiência no contexto industrial mais amplo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TIPOS DE TRITURADORES

2.1.1 TRITURADOR FORRAGEIRO

Ideais para corte e trituração de forragens, o triturador forrageiro também pode ser usado para moer sementes, cascas de cereais, cana-de-açúcar, ramas de mandioca, capim, entre outros. A troca de peneiras em alguns modelos permite

também a trituração de milho para a produção de farelos como fubá e quirera, por exemplo.

Figura 1 – Triturador forrageiro



Fonte: Royal Máquinas (2024)

2.1.2 TRITURADOR DE GRÃOS E CEREAIS SIMPLES

Utilizados para trituração manual de grãos e cereais como milho, soja, trigo e cevada, os trituradores manuais de grãos são essenciais nos processos de beneficiamento da produção.

Com eles é possível preparar o milho para canjica, moer grãos diversos, inclusive para produção de temperos artesanais.

Também são indicados para uso doméstico e, devido ao seu tamanho e simplicidade de manuseio, são extremamente fáceis de serem locomovidos. Entre as marcas mais vendidas, destaca-se os trituradores Botini.

2.1.3 TRITURADOR DE CARROS

Um triturador de carros, é uma máquina projetada para desmontar veículos automotores fora de uso de maneira eficiente e segura. Estes equipamentos são utilizados em indústrias de reciclagem de metais e de resíduos automotivos para

processar carros que não podem mais ser reparados ou que chegaram ao fim de sua vida útil.

Os trituradores de carros são construídos com uma estrutura robusta e poderosa que permite a trituração de carros inteiros em fragmentos menores, facilitando o processo de separação dos materiais recicláveis, como metal ferroso e não ferroso, plásticos e vidros. Geralmente, essas máquinas utilizam um conjunto de facas ou martelos rotativos para cortar e triturar os veículos em pedaços menores.

Após a trituração, os materiais são separados e encaminhados para reciclagem ou descarte adequado, contribuindo para a redução do volume de resíduos.

Figura 2 – Triturador de máquinas



Fonte: Royal Máquinas (2024)

2.1.4 TRITURADOR DE PIA

Triturador de alimentos, ou triturador de resíduos alimentares, é um dispositivo instalado na pia da cozinha para triturar restos de comida antes de serem descartados pelo sistema de esgoto. Este aparelho é comumente utilizado em residências e estabelecimentos comerciais para ajudar na gestão de resíduos orgânicos e reduzir o acúmulo de lixo.

Figura 3 – Triturador de alimentos



Fonte: Royal Máquinas (2024)

Ao acionar o triturador, seja por meio de um interruptor de parede, um botão no próprio dispositivo ou até mesmo por controle remoto, dependendo do modelo, dá-se início ao processo de trituração dos resíduos alimentares.

Uma vez ativado, o triturador entra em ação, suas lâminas afiadas giram rapidamente para tritar os restos de comida em pequenos pedaços, facilitando seu descarte. Durante esse processo, é comum que água corrente seja liberada para auxiliar na eliminação dos resíduos. Essa corrente de água ajuda a empurrar os pedaços triturados pelo sistema de encanamento, garantindo um fluxo suave e eficaz.

Os resíduos triturados seguem então pela tubulação até o sistema de esgoto da residência ou para um tanque séptico, onde serão tratados ou removidos conforme as práticas locais de gestão de resíduos, contribuindo para a manutenção da higiene e do bom funcionamento do sistema de saneamento doméstico.

2.2 FUNCIONAMENTO TRITURADORES / MOINHOS INDUSTRIAIS

O triturador de alimentos industrial é um tipo de máquina altamente preparada para reaproveitamento de alimentos em laticínios, frigoríficos, fabricantes de biscoitos, etc. Um exemplo notável desses trituradores são os desintegradores angulares, projetados para ocupar pouco espaço nas instalações fabris sem comprometer a capacidade de processamento. Essas máquinas são estruturadas

com um ângulo entre 30 a 45 graus, permitindo que o motor elétrico fique inclinado para facilitar a trituração e o escoamento dos produtos de forma natural, impulsionada pela gravidade, para o processo de descarga.

Além disso, os desintegradores angulares são projetados com um funil alongado, proporcionando uma experiência ergonômica ao usuário. No entanto, a verdadeira essência dessas máquinas reside em sua parte interna, especialmente no processador. Uma chapa perfurada calandrada desempenha um papel crucial, garantindo que o diâmetro interno seja precisamente tolerado para encaixe na cuba de processamento. No centro dessa chapa estão as facas de trituração, que giram com o eixo, garantindo um processo eficiente de moagem. É fundamental que essas facas sejam fabricadas com materiais resistentes, como o aço inoxidável temperado, para garantir durabilidade e atender às demandas operacionais.

As facas permanecem no centro da chapa perfurada, dentro da cuba de processamento, com uma folga mínima de aproximadamente 0,5 mm entre as extremidades de cada ponta em relação a chapa perfurada. Esse design permite que as facas, ao girarem em alta rotação, exerçam força centrífuga sobre os alimentos, triturando-os e permitindo que os resíduos passem pelos furos da chapa, escoando para a área de descarga.

As lâminas afiadas realizam o corte e trituração dos resíduos sólidos em fragmentos menores, os quais são posteriormente conduzidos através de um sistema composto por correias transportadoras ou mangueiras de sucção até um ponto de armazenamento ou para serem processados em uma central de tratamento de resíduos.

O processo de trituração baseia-se no princípio da força centrífuga, cujo cálculo é essencial para compreender a eficácia do sistema. Em movimentos circulares, a força centrífuga é uma força fictícia que se manifesta em direção oposta ao centro da circunferência descrita pelo movimento. Em contraste, a força centrípeta, uma força genuína, atua em direção ao centro da circunferência, sendo essencial para manter a trajetória circular do movimento. A força centrífuga é análoga à força centrípeta e é

determinada pelo produto da massa do corpo em movimento circular, a velocidade linear elevada ao quadrado e o raio da circunferência formada.

2.3 MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE TRITURADORES

Em ramos onde a higiene é crucial, como na indústria alimentícia ou farmacêutica, por exemplo, o aço AISI 316 é frequentemente utilizado devido à sua resistência à corrosão e facilidade de limpeza.

Porém, de modo geral, os trituradores podem ser fabricados com uma variedade de materiais, dependendo do tipo e do uso pretendido. Alguns materiais comuns incluem:

- Aço: para componentes estruturais e peças de desgaste devido à sua durabilidade e resistência;
- Metal fundido: para peças como carcaças e mandíbulas devido à sua resistência ao desgaste e impacto;
- Polímeros ou plásticos: em aplicações menos exigentes ou para partes não Estruturais.

2.3.1 AÇO INOX AISI 304

O AISI 304 é uma liga de aço inoxidável austenítico que contém geralmente cerca de 18% de cromo, 8% de níquel e pequenas quantidades de carbono, silício, manganês, fósforo, enxofre e, por vezes, outros elementos.

Este material possui alta resistência à corrosão em grande variedade de ambientes, incluindo situações de grande umidade e até mesmo altas temperaturas, sendo capaz de manter suas propriedades mecânicas em uma faixa de temperatura variável entre -196 C° a 800 C°.

Quanto às suas propriedades mecânicas, o AISI 304 atua em uma faixa típica de resistência à tração de 515 a 690 MPa.

Sua resistência de escoamento varia de 205 a 275 MPa, e sua dureza varia em torno de 70 HRB (escala de dureza de Rockwell B) quando o material passa pelo processo de tratamento térmico.

Além disso, exibe boa ductilidade e tenacidade, o que o torna adequado para uma variedade de processos de conformação mecânica, como laminação, estampagem e dobra.

O aço inox AISI 304 é facilmente fabricado e processado por meio de técnicas como soldagem, usinagem, forjamento e conformação a frio.

2.3.2 AÇO INOX AISI 316

O AISI 316, assim como o 304, é um tipo de aço inoxidável austenítico comumente utilizado em uma variedade de aplicações industriais. Porém, devido a sua composição de 16% de cromo, 10% de níquel e 2% de Molibdênio, este material apresenta maior resistência à corrosão em comparação com os aços inoxidáveis convencionais.

Este material tem como uma de suas características mais notáveis sua excelente resistência à corrosão em diversos ambientes, incluindo o ambiente marinho, ácidos e produtos químicos agressivos.

Quanto às suas propriedades, o aço AISI 316 mantém sua resistência mecânica e resistência à corrosão em temperaturas elevadas, tornando-o adequado para uso em aplicações onde as temperaturas podem variar significativamente. Além disso, exibe boa ductilidade e tenacidade, tornando-o adequado para processos de conformação, soldagem e usinagem.

A manutenção deste material geralmente é baixa ou nula, devido à sua alta resistência à corrosão e durabilidade, o que pode resultar em economia de custos a longo prazo.

2.3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS AÇO 304 E 316

A diferença entre os aços 304 e 316 é que o AISI 316 conta com aproximadamente 2,50% de molibdênio em sua composição, o que garante a essa classe de aço inox uma qualidade superior para as mesmas aplicações do aço 304.

Em resumo, o aço 304 é mais indicado para aplicações gerais, já o AISI 316 será mais vantajoso quando se é necessário maior resistência à corrosão, mesmo que isso implique em um custo um pouco mais alto.

2.4 LÂMINAS PARA TRITURADORES

As lâminas são ferramentas essenciais em diversas áreas da vida moderna, desde a cozinha até a indústria. Com uma variedade de materiais, formas e designs, as lâminas são adaptadas para uma ampla gama de tarefas e necessidades.

As lâminas de aço inoxidável são amplamente reconhecidas por sua resistência à corrosão, o que as torna ideais para ambientes úmidos e onde há contato frequente com alimentos. Estas lâminas são comumente utilizadas em facas de cozinha, instrumentos cirúrgicos e facas de bolso devido à sua durabilidade e facilidade de manutenção.

Por outro lado, as lâminas de cerâmica, feitas de óxido de zircônio, destacam-se por sua extrema afiação e capacidade de manter a nitidez por longos períodos. São frequentemente encontradas em facas de cozinha, proporcionando cortes precisos e suaves.

No entanto, elas são mais frágeis do que as lâminas de aço e devem ser manuseadas com cuidado para evitar quebras.

As lâminas serrilhadas possuem dentes ao longo da borda, facilitando o corte de materiais com texturas irregulares, como pão, carne com crosta e tecidos. A ação de serra dos dentes permite cortes eficientes sem a necessidade de muita pressão, tornando-as ideais para tarefas que exigem cortes mais agressivos.

Já as lâminas de fio reto possuem uma borda lisa e contínua, sendo perfeitas para cortes precisos e controlados. Elas são frequentemente usadas para cortar legumes e carnes em fatias finas, onde a precisão é essencial. Sua versatilidade faz

delas uma ferramenta indispensável em cozinhas e outros ambientes que exigem precisão no corte.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento do shredder desaguador seguiu uma abordagem estruturada, dividida em etapas fundamentais para garantir a eficácia do projeto. Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente para identificar os principais tipos de trituradores existentes, bem como os materiais e tecnologias mais adequados para o contexto da indústria alimentícia.

Com base nessa fundamentação teórica, o projeto do shredder desaguador foi modelado utilizando softwares de CAD (Computer-Aided Design) onde todas as especificações técnicas foram detalhadamente definidas, como a escolha do motorreductor, as dimensões das lâminas e a estrutura em aço inoxidável AISI 304.

Em seguida, foram realizados cálculos de engenharia para determinar a força e o torque necessários para a trituração eficiente dos resíduos alimentares. A projeção dos resultados incluiu a avaliação do desempenho do shredder, a eficácia do sistema de desaguamento, e a conformidade com as normas de segurança, como NR12. Além disso, foram realizadas cotações de materiais e serviços para estimar os custos do projeto, garantindo a viabilidade econômica do equipamento. Finalmente, os dados obtidos foram compilados e analisados para otimizar o design final do shredder, culminando em uma solução prática e eficiente para a gestão de resíduos alimentares, com foco na sustentabilidade e na melhoria dos processos produtivos.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O shredder desaguador proposto é composto por uma estrutura em aço inoxidável AISI 304, acoplada a um motorreductor que por sua vez aciona um eixo

rotativo com lâminas muito afiadas e de alta resistência. O movimento rotativo é transferido através de um sistema de chavetas e engrenagens. O funcionamento basicamente acontece quando o motorreductor é acionado, as lâminas giram em uma velocidade baixa com aproximadamente 22 RPM e alto torque.

Para iniciar a modelagem foi dimensionado um modelo de motorreductor que tem uma carcaça pequena com uma força ideal para uma máquina trituradora de alimentos de pequeno porte, o modelo selecionado foi o redutor VF44P 70 P63 V14 B3 e motor BN63 4P 0,12Kw com graxa alimentícia, proporcionando um torque de 29Nm. Serão dois eixos paralelos que farão uma força de 32Kg cada um, ou seja, 64Kg de força total para triturar o alimento.

Junto ao processo do shredder estará também acoplada uma peneira inclinada, para que toda a água/ umidade que ainda possa estar presente nos alimentos seja removida após o processo de trituração.

Na Figura 4 contém as principais vistas do shredder, traseira, frontal, lateral e superior respectivamente.

Figura 4 – Vistas da máquina



Fonte: Royal Máquinas (2024)

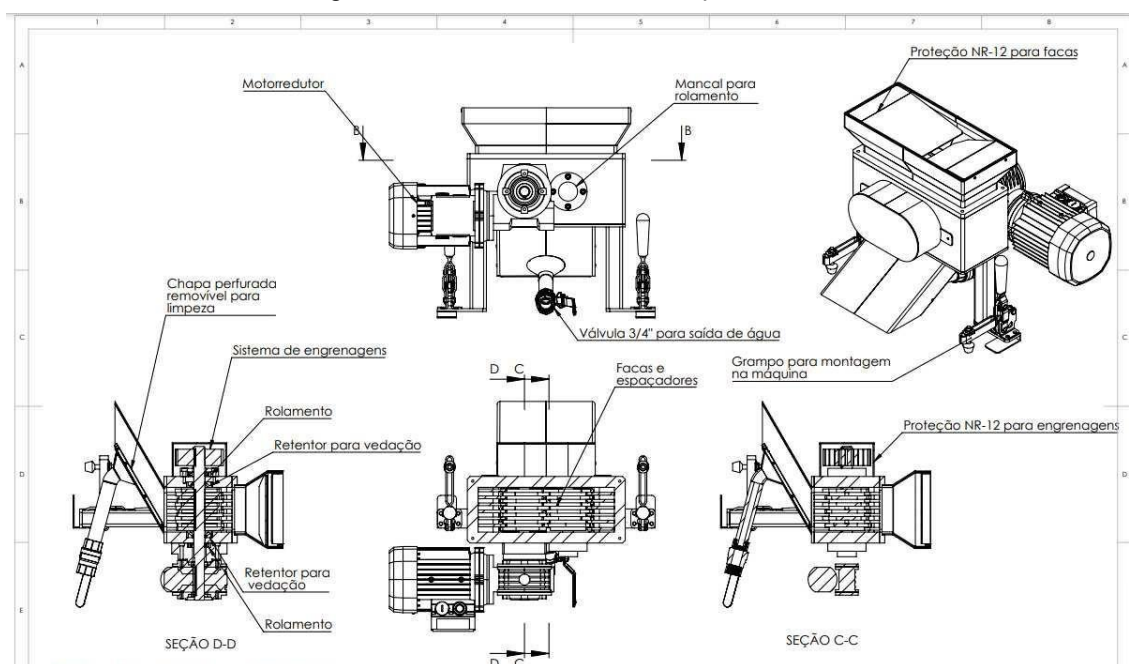
O processo ocorre da seguinte maneira:

- 1- Os alimentos são inseridos no shredder pelo funil de abastecimento, onde inicia o processo de trituração dos alimentos;

- 2- Após a trituração, os alimentos seguem para a peneira inclinada e escorrem a água que ainda poderia estar presente no resíduo;
- 3- A água é liberada pelo dreno, através de uma válvula borboleta $\frac{3}{4}$ ";
- 4- Os produtos sólidos seguem para a descarga e para a máquina já existente do cliente;
- 5- Após estes processos, os resíduos estão prontos para adubo.

Na Figura 5 contém todas as características do shredder, como o modelo das engrenagens, os mancais dos rolamentos, encaixes de retentores de vedação e sistema de peneira para desaguar o produto.

Figura 5 – Características da máquina

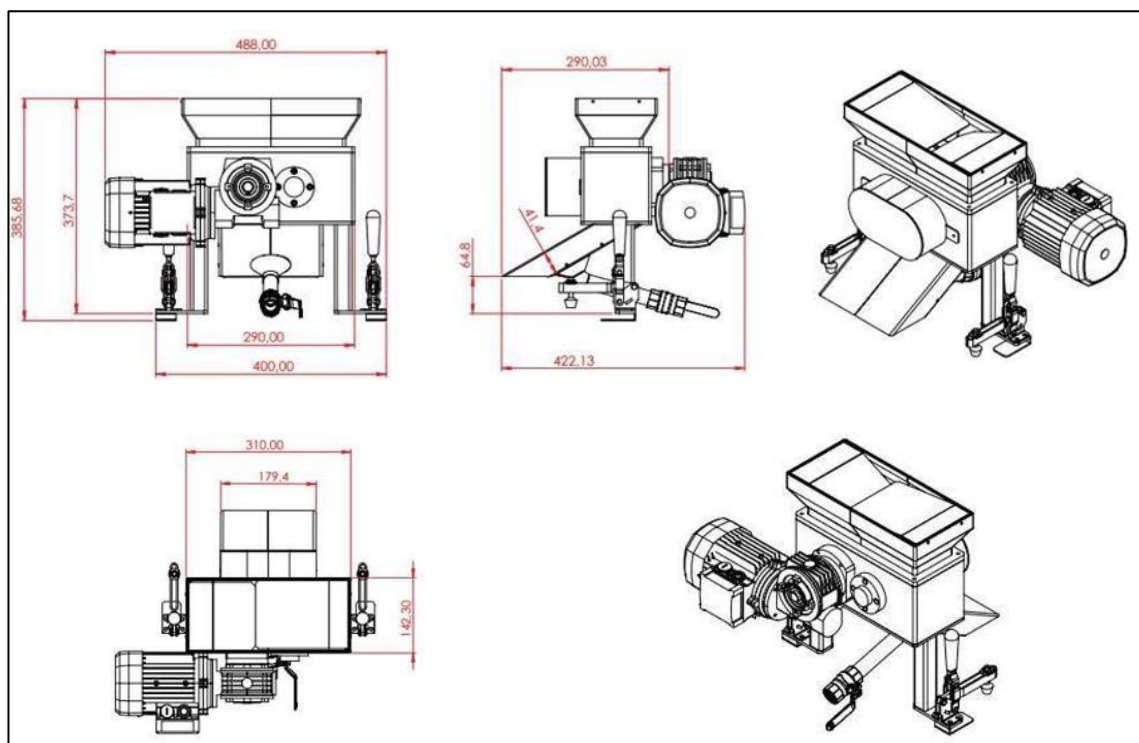


Fonte: Os autores (2024)

O sistema de peneira e funil foi preparado para limpeza e manutenção, dessa forma, as peças podem ser desparafusadas para melhor acesso ao mecanismo interno. Para seguir as normas NR12, foram feitas grades de proteção, também removíveis, na parte superior do triturador e para as engrenagens, não correndo

riscos de acidentes. Para engate, caso necessário, foi previsto um sistema de encaixe mecânico acionado manualmente pelo usuário, proporcionando uma forma mais rápida para a instalação do equipamento sobre qualquer outra máquina.

Figura 6 – Dimensionamento da máquina



Fonte: Os autores (2024)

No que diz respeito aos materiais que foram utilizados para a concepção do projeto, foram especificados conforme os seguintes requisitos: resistência, durabilidade e que sejam adequados para alimentos. Dessa forma, optou-se pelo aço inox 304, pois é o material mais indicado para este tipo de aplicação.

Na sequência, foram realizadas cotações de todos os materiais que seriam necessários para a execução do projeto, juntamente com seus custos unitários. Assim, foi formatada a tabela abaixo, conforme média orçamentária nacional, a qual descreve medidas pré-definidas, a quantidade de matéria prima em

quilograma, preço do quilograma no mercado, e seu custo final estimado para a compra.

Figura 7 – Custos dos materiais

Custo Schredder			
Matéria prima			
MP	Kg	Valor/kg	Total
Chapa 25,4mm	22	R\$ 41,37	R\$ 910,14
Chapa 38,1mm	7	R\$ 52,00	R\$ 364,00
Barra redonda ø22,22	1,8	R\$ 19,20	R\$ 34,56
Chapa 6,35mm	9,096	R\$ 18,54	R\$ 168,64
Chapa 5mm	5,2	R\$ 18,61	R\$ 96,77
Barra redonda ø88,9	4,4	R\$ 20,50	R\$ 90,20
Barra redonda ø101,6	2,6	R\$ 29,00	R\$ 75,40
Chapa 9,53	2	R\$ 19,02	R\$ 38,04
Chapa 2mm	5,12	R\$ 21,65	R\$ 110,85
Barra redonda ø6,35	0,02	R\$ 19,31	R\$ 0,39
Chapa 3,5mm	0,08	R\$ 21,42	R\$ 1,71
Barra redonda ø25,4	0,6	R\$ 19,49	R\$ 11,69
Tubo quadrado 30x30x2	0,5	R\$ 21,43	R\$ 10,72
			R\$ 1.913,11
Itens comerciais			
Engrenagem	2	R\$ 132,00	R\$ 264,00
Rolamento 16004	4	R\$ 10,50	R\$ 42,00
Chapas perfuradas	1	R\$ 130,00	R\$ 130,00
Chapa perfurada menor	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Curva 45° ¾	1	R\$ 15,27	R\$ 15,27
Grampo de montagem	2	R\$ 66,50	R\$ 133,00
Redutor VF44P 70 P63 V14 B3 0,12kw	1	R\$ 1.576,00	R\$ 1.576,00
Motor	1	R\$ 855,50	R\$ 855,50
Retentor ø20x47x10	4	R\$ 13,00	R\$ 52,00
Parafusos	-	R\$ 20,00	R\$ 20,00
			R\$ 3.127,77

Fonte: Os autores (2024)

Figura 8 – Custos estimados do serviço

Serviço terceiro		
Item	Descritivo	
Usinagem Calandra	Chaveta de todas	
	as facas, canal	R\$ 2.500,00
	para retentor	R\$ 50,00
	Cone	R\$ 2.550,00
Custo total estimado:		R\$ 7.590,88

Fonte: Os autores (2024)

4.1 PROJEÇÃO DE RESULTADOS

4.1.1 DESEMPENHO MECÂNICO

Torque e Força: O shredder desaguador, equipado com o motorreductor VF44P 70 P63 V14 B3 e motor BN63 4P 0,12Kw, proporciona um torque de 29Nm, o que, de acordo com os cálculos, resulta em uma força total de 64 kg para triturar os alimentos. Este valor é adequado para o porte do equipamento, confirmando a viabilidade do sistema para o processamento de resíduos alimentares.

Eficácia da Trituração: Com as lâminas afiadas e a rotação de 22 RPM, o equipamento tem a capacidade de apresentar eficiência na trituração dos alimentos, o que é essencial para o processo subsequente de desaguamento e preparação do resíduo para adubo.

4.1.2 SISTEMA DE DESAGUAMENTO

Peneira Inclínada: A inclusão da peneira inclinada para remoção de água/umidade tem potencial eficaz, permitindo a separação eficiente dos sólidos e líquidos. A disposição do dreno com válvula borboleta $\frac{3}{4}$ " tem o potencial de contribuir no escoamento controlado da água.

Resultado do Produto: Os resíduos alimentares, após passarem pelo shredder e pela peneira, tem o potencial de serem utilizados como adubo, mostrando que o sistema atende ao objetivo principal do projeto.

4.1.3 SEGURANÇA E MANUTENÇÃO

Normas de Segurança: A aderência à NR12, com a inclusão de grades de proteção removíveis, garante a segurança operacional, minimizando o risco de acidentes.

Manutenção: A escolha de componentes removíveis para o sistema de peneira e funil facilita a manutenção, o que é positivo para a longevidade do equipamento e a redução de custos operacionais a longo prazo.

4.1.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Escolha do Aço Inox AISI 304: A seleção do aço inoxidável AISI 304 é potencialmente adequada, dada sua resistência à corrosão, durabilidade, e conformidade com os requisitos de segurança alimentar. Isso assegura que o shredder desaguador será durável e seguro para uso contínuo em ambiente alimentar.

4.1.5 CUSTOS E VIABILIDADE

A cotação mostrou-se adequada dentro dos parâmetros estabelecidos, e os custos unitários foram bem delineados, permitindo um orçamento claro e bem definido para o cliente. Esse planejamento detalhado favorece a tomada de decisão e a previsão de retorno sobre o investimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do shredder desaguador representa uma solução inovadora para o processamento de resíduos alimentares na indústria alimentícia. Com componentes cuidadosamente escolhidos, como o motorreductor VF44P e o motor BN63, e uma estrutura em aço inoxidável AISI 304, o equipamento oferece alta durabilidade, eficiência e segurança.

O motorreductor proporciona um torque de 29Nm, garantindo uma trituração eficiente, enquanto o sistema de peneira inclinada e a válvula borboleta $\frac{3}{4}$ " permitem um desaguamento eficaz e controlado. A conformidade com a NR12 é assegurada por grades de proteção removíveis. O design modular facilita a manutenção e reduz os custos operacionais, e o uso de aço inoxidável garante longevidade e segurança alimentar. O planejamento econômico do projeto é sólido, com uma cotação detalhada dos materiais, e o equipamento é viável financeiramente. Futuras melhorias podem incluir a integração de sensores e adaptações para diferentes tipos de resíduos, aumentando a eficiência e versatilidade do shredder.

REFERÊNCIAS

BORTOLOTTI, R. (2012). **Projeto e dimensionamento de máquinas e equipamentos**. Editora LTC.

SILVA, M. A. (2011). **Engenharia de processos: Fundamentos e aplicações**. Editora Oficina de Textos.

ROYAL MÁQUINAS. **Trituradores: conheça os tipos disponíveis e como escolher o ideal para o seu agronegócio**. Royal Máquinas, 2024. Disponível em: <https://www.royalmaquinas.com.br/blog/trituradores-conheca-os-tipos-disponiveis-e-como-escolher-o-ideal-para-o-seu-agronegocio/>. Acesso em 13 mai. 2024.

TECMUNDO. **Super máquina trituradora destrói carros inteiros em segundos.** Tecmundo, 2024. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/carro/89043-super-maquina-trituradora-destro-i-carros-inteiros-segundos-video.htm>. Acesso em: 13 mai. 2024.

Lawless, E. A., & Singh, R. P. (2003). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. John Wiley & Sons.

SHIGLEY, J. E., & MISCHKE, C. R. (2001). **Mechanical engineering design**. McGraw-Hill Education.

COULSON, J. M., & RICHARDSON, J. F. (2002). **Introduction to chemical engineering**. Pergamon Press./



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]