

MEC - SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *Campus* FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA
CORRENTE DESBALANCEADA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Nome: Stéfany Evelyn Dias Rodrigues

Orientador: Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva

FORMIGA - MG

2025

STÉFANY EVELYN DIAS RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA
CORRENTE DESBALANCEADA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Formiga* como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva

FORMIGA - MG

2025

Rodrigues, Stéfany Evelyn Dias

R696d Desenvolvimento de um dispositivo de proteção contra corrente desbalanceada em motores de indução trifásicos / Stéfany Evelyn Dias Rodrigues – Formiga : IFMG, 2025.

81 p. :il. color.

Orientador: Prof. MSc. Marcus Vinícius de Paiva

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Formiga*.

1. Motores de indução trifásicos. 2. Desbalanceamento de corrente. 3. Falta de fase. 4. Desbalanceamento de tensão. 5. Dispositivo de proteção. I. Paiva, Marcus Vinícius de. II. Título.

CDD 621.3

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Lívia Renata Santos- CRB/6-2561

STÉFANY EVELYN DIAS RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA
CORRENTE DESBALANCEADA EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus Formiga*, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

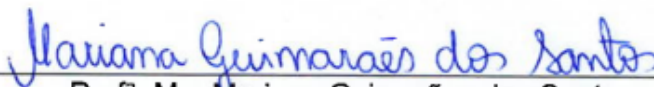
Avaliado em: 23 de janeiro de 2025 .

Nota: 100 pontos.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva (Orientador)



Profª. Me. Mariana Guimarães dos Santos



Prof. Me. Marco Antônio Silva

FORMIGA - MG

2025

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio e por serem minha força constante.
À minha irmã, que sempre acreditou em mim e me incentivou a seguir em frente.
E ao meu noivo, pelo amor, compreensão e cumplicidade em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus e ao Venerável Servo de Deus, Padre Libério, por me concederem forças por todos estes longos anos de faculdade. Foi através da fé e das bênçãos recebidas que encontrei a motivação necessária para enfrentar os desafios e alcançar a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Patrícia e Francisco, por tudo que fizeram e continuam fazendo por mim. Obrigada por serem meu alicerce, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e confortando em todas as etapas. Sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço à minha irmã, Rislley, por ser minha companheira e confidente, por acreditar que eu seria capaz de tudo e por vibrar comigo todas as minhas conquistas. Você é tudo para mim.

Agradeço ao meu noivo e parceiro de vida, Rodrigo, que vivenciou comigo cada momento de alegria e de tristeza. Sua paciência, amor e apoio foram fundamentais para a minha jornada. Amo muito você.

Agradeço à minha madrinha, Maria Lídia, e ao meu padrinho, Geraldo, por serem como pais para mim, acompanhando todas as etapas da minha vida desde o meu nascimento. Obrigada pela presença constante e todas as orações.

Agradeço à minha avó, Fátima, que recentemente foi morar no céu. Ela sempre comemorou minhas conquistas e se alegrava cada vez que eu voltava de Formiga. Sua constante vibração pelo meu sucesso foi um grande incentivo ao longo da minha vida.

Agradeço fortemente às amigas que a faculdade me deu, Bruna e Thais. Vocês foram minha alegria diária, sempre ao meu lado nos momentos de risadas, nos estudos intermináveis e nas horas difíceis. Vocês me apoiaram, inspiraram e tornaram essa jornada muito mais fácil. Sou profundamente grata por cada conversa, por cada abraço e por cada memória que criamos juntas. Agradeço também aos meus amigos, Henrique, Bruno Ribeiro e Fábio, por toda a ajuda e por tornarem a faculdade mais leve e divertida.

Agradeço ao meu professor e orientador, Marcus Vinícius, por todos os ensinamentos, pela ajuda incansável e pela paciência ao longo deste percurso. Sua orientação foi fundamental para meu crescimento acadêmico e para realização deste sonho.

Agradeço ao IFMG - Formiga, incluindo todos os funcionários e professores, por serem parte fundamental da minha formação e história.

Por fim, agradeço a mim mesma por todo esforço, dedicação e persistência.

*“Combati o bom combate, terminei a corrida,
gardei a fé.”*

(2 Timóteo 4:7)

RESUMO

Os motores de indução trifásicos são muito utilizados na maioria dos processos industriais, sendo considerados um dos principais ativos das empresas. Dessa forma, para que ele possua um bom funcionamento e uma maior vida útil, é necessário que ele seja protegido contra qualquer tipo de falha que pode levá-lo a um comportamento inadequado ou parada inesperada e, até mesmo, um dano irreversível. Um dos problemas mais comuns destes motores é o desbalanceamento de corrente elétrica, o qual limita a sua vida útil, podendo ocasionar deterioração do isolamento das suas bobinas e, a depender da intensidade do desbalanceamento, à queima do motor. Esses danos ocorrem devido ao aumento da corrente elétrica nos enrolamentos que, por sua vez, podem ser consequência de um desbalanceamento de tensão ou falta de fase. Atualmente no mercado, existem alguns dispositivos de proteção de motores elétricos. Como exemplo, cita-se os relés de falta de fase, porém, devido ao seu princípio de funcionamento e da característica da tensão elétrica, estes não são capazes de identificar falhas após o ponto onde se encontram instalados. Desse modo, a partir do ponto de instalação, o relé não conseguirá identificar nenhuma falta de fase. Mediante isso, esse trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico de proteção, baseado no princípio de que a corrente em um circuito série é igual em qualquer parte deste circuito, ou seja, independente do local de instalação do dispositivo no circuito de força, haverá a detecção do desbalanceamento das correntes ou a da falta de fase. O dispositivo desenvolvido obteve os resultados esperados, conseguindo cessar o funcionamento do motor no momento das falhas aplicadas ao longo dos testes e estes serão apresentados no decorrer do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Palavras-chave: Motores de indução trifásicos. Desbalanceamento de corrente. Falta de fase. Dispositivo de proteção.

ABSTRACT

Three-phase induction motors are widely used in most industrial processes and are considered one of the main assets of companies. Thus, in order for it to work well and have a longer useful life, it is necessary that it is protected against any type of failure that can lead to improper behavior or unexpected stop, and even irreversible damage. One of the most common problems of these motors is the electric current unbalance, which limits their useful life, which can cause deterioration of the insulation of their coils and, depending on the intensity of the unbalance, the burning of the motor. This damage occurs due to the increase in electrical current in the windings which, in turn, can be a consequence of a voltage unbalance or phase loss. Currently on the market, there are a few electric motor protection devices. As an example, phase loss relays are mentioned, however, due to their operating principle and the characteristic of the electrical voltage, they are not able to identify faults after the point where they are installed. In this way, from the point of installation, the relay will not be able to identify any phase loss. Therefore, this work proposes the development of an electronic protection device, based on the principle that the current in a series circuit is equal in any part of this circuit, that is, regardless of the location of installation of the device in the power circuit, there will be the detection of current unbalance or phase loss. The developed device obtained the expected results, managing to cease the operation of the engine at the time of the failures applied throughout the tests and these will be presented during the development of this Final Paper.

Keywords: Three-phase Induction Motors. Current Unbalance. Phase Loss. Protection Device.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação setorial do consumo de eletricidade.....	15
Figura 2 - Utilização dos sistemas motrizes nas indústrias.....	15
Figura 3 - Partes constituintes do motor de indução trifásico.....	20
Figura 4 - Estator.....	20
Figura 5 - Parte ativa do estator.....	21
Figura 6 - Rotor gaiola de esquilo.....	22
Figura 7 - Disposição dos elementos do rotor gaiola de esquilo.....	22
Figura 8 - Rotor bobinado.....	23
Figura 9 - Elementos de rotor bobinado.....	23
Figura 10 - Ondas de correntes em cada instante.....	24
Figura 11 - Fluxos individuais e resultantes em cada instante.....	24
Figura 12 - Campo magnético girante.....	25
Figura 13 - Funcionamento do MIT.....	25
Figura 14 - Fluxograma do funcionamento do MIT.....	26
Figura 15 - Desequilíbrio de tensão em módulo e ângulo.....	28
Figura 16 - Oposição entre os campos de sequência positiva e negativa.....	31
Figura 17 - Desequilíbrio de tensão em módulo e ângulo.....	31
Figura 18 - Comparação entre os 4 métodos de quantificação utilizando o software OpenDSS. 35	
Figura 19 - Comparação entre os métodos de cálculo de desequilíbrio de tensão.....	36
Figura 20 - Comportamento do motor sob condição de falta de fase.....	37
Figura 21 - Condição monofásica do motor.....	38
Figura 22 - Corrente do motor durante condições monofásicas.....	38
Figura 23 - Relé de falta de fase.....	41
Figura 24 - Relé de subtensão e sobretensão.....	41
Figura 25 - Relé de sobrecarga térmico RW.....	42
Figura 26 - Relé de sobrecorrente.....	43
Figura 27 - Esquemático das conexões.....	45
Figura 28 - Montagem física para realização dos testes no motor.....	45
Figura 29 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão estrela em regime).....	51
Figura 30 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão triângulo em regime).....	52
Figura 31 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão estrela na partida).....	53

Figura 32 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão triângulo na partida).....	55
Figura 33 - Configuração inicial do dispositivo proposto.....	56
Figura 34 - Circuito de força e comando.....	56
Figura 35 - Simulação na plataforma Tinkercad.....	57
Figura 36 - Fluxograma da lógica do circuito inicial.....	58
Figura 37 - Sensor de corrente HWCT.....	58
Figura 38 - Forma de onda da tensão no resistor de carga.....	59
Figura 39 - Circuito offset.....	60
Figura 40 - Forma de onda com offset.....	61
Figura 41 - Circuito final.....	61
Figura 42 - Variável de calibração.....	62
Figura 43 - Fluxograma do circuito final.....	62
Figura 44 - Circuito com a adição dos sensores de corrente no software Proteus.....	63
Figura 45 - Montagem do circuito implementado na plataforma Tinkercad.....	64
Figura 46 - Montagem do circuito final implementado no software Proteus.....	65
Figura 47 - Esquemático de ligação dos circuitos de força e de comando.....	66
Figura 48 - Montagem do circuito final dia 1.....	67
Figura 49 - Montagem do circuito final dia 2.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos e taxas de falhas ocorridas em motores trifásicos industriais.....	27
Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão do método do CIGRÉ e das componentes simétricas estabelecidos pelo PRODIST.....	34
Tabela 3 - Limites para os desequilíbrios de tensão em diferentes normas.....	34
Tabela 4 - Valor calculado do desequilíbrio de tensão para os quatro métodos.....	35
Tabela 5 - Efeitos do desequilíbrio de tensão nos motores de indução trifásicos.....	39
Tabela 6 - Vida útil em motores.....	40
Tabela 7 - equipamentos utilizados para realização dos testes.....	44
Tabela 8 - Desbalanceamento de tensão em ligação estrela, com variação na fase B.....	46
Tabela 9 - Valores médios de corrente para as fases A, B e C e corrente média geral.....	46
Tabela 10 - Desbalanceamento de tensão em ligação triângulo, com variação na fase B.....	47
Tabela 11 - Valores médios de corrente para as fases A, B e C e corrente média geral.....	47
Tabela 12 - Falta da fase B em regime de operação em ligação estrela.....	48
Tabela 13 - Falta da fase B em regime de operação em ligação triângulo.....	48
Tabela 14 - Falta da fase B na partida em ligação estrela.....	49
Tabela 15 - Falta da fase B na partida em ligação triângulo.....	49
Tabela 16 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão estrela em regime).....	50
Tabela 17 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão triângulo em regime)..	51
Tabela 18 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão estrela na partida).....	53
Tabela 19 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão triângulo na partida)...	54
Tabela 20 - Valores dos componentes utilizados para o desenvolvimento do dispositivo.....	69
Tabela 21 - Valores dos dispositivos existentes no mercado.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC - Corrente Alternada

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

C - Grau Celsius

CIGRÉ - Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos

DC - Desbalanceamento de Corrente

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FF - Falta de Fase

GND - *Ground*

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

K - Kelvin

LED - Diodo Emissor de Luz

MIT - Motor de Indução Trifásico

NEMA - *National Electrical Manufacturers Association*

PCB - Placa de Circuito Impresso

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

RMS - *Root Mean Square*

TD - Desequilíbrio de Tensão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Contexto.....	15
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Objetivo Geral.....	18
1.4 Objetivos Específicos.....	18
1.5 Estrutura do Trabalho.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Principais características dos Motores de Indução Trifásicos.....	19
2.1.1 Partes Constituintes.....	19
2.1.2 Princípio de Funcionamento.....	23
2.1.3 Principais falhas dos Motores de Indução Trifásicos.....	26
2.2 Desbalanceamento de Tensão em Motores de Indução Trifásicos.....	29
2.2.1 Principais causas do Desbalanceamento de Tensão.....	29
2.2.2 Consequências do Desbalanceamento de Tensão.....	30
2.2.3 Métodos de quantificação de desequilíbrios de tensão.....	32
2.2.3.1 Método da NEMA.....	32
2.2.3.2 Método do IEEE.....	32
2.2.3.3 Método das componentes simétricas.....	33
2.2.3.4 Método de CIGRÉ.....	33
2.2.3.5 Limites recomendados e comparação entre os métodos.....	34
2.3 Desbalanceamento de Corrente em Motores de Indução Trifásicos.....	36
2.3.1 Efeito do desequilíbrio de tensão no aumento de corrente.....	36
2.3.2 Efeito Térmico.....	38
2.4 Proteções contra as falhas causadas por Desbalanceamento de Tensão e Corrente... 40	
2.4.1 Dispositivos de Proteção existentes no mercado.....	40
2.4.2 Problemas identificados nos dispositivos existentes.....	43
2.4.3 Proposta de solução dos problemas identificados.....	43
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	44
3.1 Testes no motor.....	44
3.2.1 Teste de desbalanceamento de tensão.....	45
3.2.2 Teste de falta de fase.....	48
3.2.1 Teste da variação da corrente em função da resistividade.....	49
3.2 Dispositivo proposto.....	55
3.3 Princípio de funcionamento.....	57
3.4 Desenvolvimento do dispositivo.....	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
4.1 Instalação do dispositivo junto ao motor.....	66
4.2 Levantamento do custo de mercado do dispositivo desenvolvido.....	68
5. CONCLUSÃO.....	71
6. TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
APÊNDICE A – VERSÃO FINAL DO CÓDIGO DO DISPOSITIVO.....	78

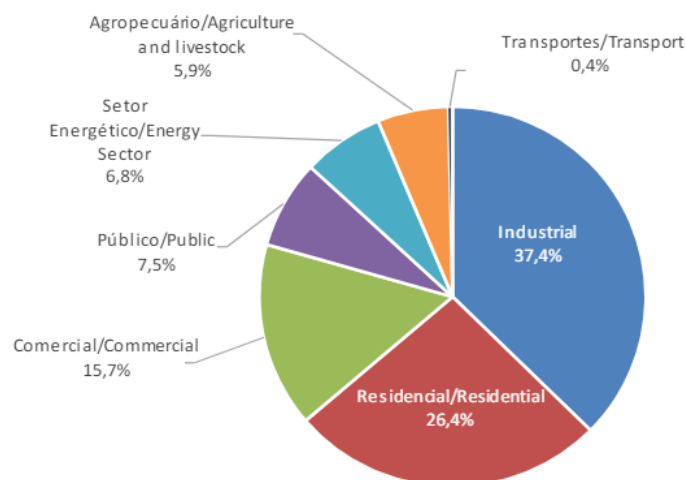
1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve introdução da problemática que fundamentou o desenvolvimento do dispositivo proposto neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Mais especificamente, são apresentados o contexto atual acerca dos principais problemas por consequência das falhas dos motores de indução trifásicos e os principais dispositivos de proteção. Além disso, a justificativa para o desenvolvimento da proposta e os objetivos a serem alcançados são expostos. Ao final é apresentada a forma como este trabalho está organizado e o conteúdo principal de cada capítulo.

1.1 Contexto

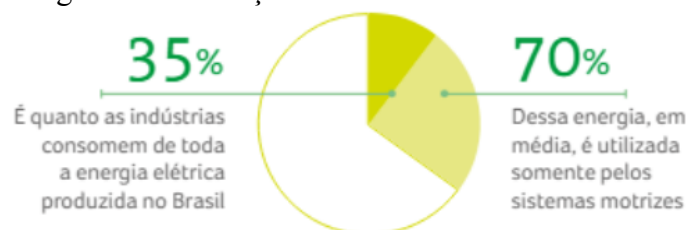
O setor industrial se destaca como o maior consumidor de energia elétrica no Brasil, absorvendo aproximadamente 38% do total produzido no país. Dentro desse contexto, os motores assumem uma parcela significativa, sendo responsáveis por cerca de 70% desse consumo. A Figura 1 e a Figura 2 apresentam detalhes dos dados citados.

Figura 1 - Participação setorial do consumo de eletricidade.



Fonte: Balanço Energético Nacional - EPE, 2022.

Figura 2 - Utilização dos sistemas motrizes nas indústrias.



Fonte: PROCEL, 2021.

Esses números evidenciam a importância dos motores nos estudos de demanda energética industrial, ressaltando a necessidade de se adotarem tecnologias e práticas mais eficientes para reduzir custos e impactos ambientais (FREITAS *et al.*, 2008). Em comparação com outros equipamentos em uma planta industrial, os motores elétricos apresentam eficiência significativa, ou seja, aproveitam bem a energia que recebem para desempenhar suas funções. Essa alta eficiência e as vantagens de aplicação, fazem com que os motores elétricos sejam amplamente utilizados na indústria e, conseqüentemente, sejam responsáveis por uma parcela significativa do consumo total de energia elétrica (WEG, 2019).

O motor de indução trifásico se destaca entre os diferentes tipos de motores elétricos existentes por sua operação simples, construção robusta e baixa necessidade de manutenção. Além disso, aliado aos avanços no setor de automação industrial, sua fabricação se tornou mais eficiente, resultando em um preço acessível. Com o avanço tecnológico, surgiram métodos de controle para esse tipo de motor que reduzem a dissipação de energia, bem como otimizam sua operação, contribuindo para o uso mais eficiente da eletricidade. Esses avanços têm ampliado as aplicações e a utilidade do motor de indução trifásico em diversos setores (GUEDES, 1994).

Dado o amplo uso e a importância desses motores nas fábricas, uma falha nestes pode interromper parcial ou totalmente os processos produtivos, resultando em prejuízos financeiros devido aos custos de manutenção ou substituição dos equipamentos, levando à redução no volume da produção e aumentando o tempo ocioso dos colaboradores durante as paradas (STIEF *et al.*, 2019 *apud* NETO *et al.*, 2023).

1.2 Justificativa

Um dos problemas mais comuns nos motores de indução trifásicos é o desbalanceamento de corrente elétrica que pode ser proveniente de flutuações na tensão de alimentação do motor. Essas flutuações podem ser por alimentação com desequilíbrio entre as fases, que geram correntes excessivas circulando no motor, provocando perdas, elevação de temperatura e conseqüente redução da vida útil (REZENDE; SAMESIMA, 2013). Em casos extremos, pela falta de uma das fases, que independentemente da configuração de conexão (estrela ou triângulo), os impactos nos enrolamentos dos motores são ainda mais consideráveis (MAMEDE FILHO, 2017).

Por esse motivo, a proteção dos motores elétricos tem sido objeto de estudo, tanto no Brasil quanto no mundo todo. Isso se deve à preocupação constante dos setores produtivos em

preservar seus equipamentos elétricos, seus principais ativos, o que é crucial para manter a produção em funcionamento adequado, evitar paradas prejudiciais aos processos produtivos e grandes prejuízos financeiros (DIAS, 2013).

Uma forma de proteção muito utilizada em motores de indução trifásicos são os relés, dispositivos destinados a operar quando uma grandeza, principalmente elétrica, atinge um determinado valor pré-definido. Podem ser classificados quanto à grandeza de atuação, forma de conectar ao circuito, forma construtiva, temporização, função e característica de atuação (MARDEGAN, 2010). Essas características técnicas definem os limites necessários para os esquemas de proteção e coordenação em sistemas elétricos específicos (DIAS, 2013).

No mercado já existem alguns relés destinados a mitigar alguns destes problemas. Um exemplo é o relé de falta de fase. Esse dispositivo recebe as três fases do circuito de alimentação e, enquanto o relé identifica estas três fases, o circuito funciona normalmente. Caso o dispositivo verifique a ausência de uma das fases, o circuito é interrompido (MATTEDE, 2016). Para o funcionamento adequado, esse dispositivo precisa ser instalado após qualquer outro equipamento que possa funcionar de maneira monopolar, pois é sensível à falta de uma fase em todo o sistema, desde a origem até o ponto de instalação (MAMEDE FILHO, 2017).

Outros exemplos que verificam a variável tensão são os relés de subtensão e sobretensão, que fazem a interrupção do circuito quando a tensão pré estabelecida do sistema diminui e aumenta, respectivamente (MARDEGAN, 2010). Além dos exemplos citados, tem-se o relé de sobrecorrente que opera com base na corrente elétrica do sistema, ativando-se quando essa corrente atinge ou supera um valor máximo pré-determinado. Ele monitora as variações de corrente com referência a uma corrente denominada *pick-up*. Dessa forma, quando a corrente de defeito ultrapassa a corrente de ajuste do sensor do relé, este atua de forma instantânea ou temporizada (TEIXEIRA, 2017).

Uma desvantagem dos relés citados, que verificam a variável tensão, é que a partir do ponto de instalação, estes dispositivos têm dificuldade para identificar anormalidades no sistema. Em relação ao relé de sobrecorrente, que opera com base na corrente elétrica para a carga, este apenas identifica a condição relacionada à sobrecorrente no circuito de alimentação desta.

Com base nisso, este Trabalho de Conclusão de Curso propõe a criação de um dispositivo eletrônico de proteção que se fundamenta no fato de que a corrente em um circuito em série é uniforme em todas as partes desse circuito. Isso significa que, independentemente

do ponto de instalação do dispositivo no circuito de alimentação, ele será capaz de detectar desequilíbrios nas correntes e a ausência de uma ou mais fases. Em outras palavras, seja antes ou após o ponto de sua instalação, o dispositivo será capaz de identificar tais anormalidades. Além disso, será um dispositivo mais completo, uma vez que monitora tanto a variável tensão quanto a variável corrente, podendo substituir outros equipamentos em um único.

1.3 Objetivo Geral

Esta monografia tem como objetivo desenvolver um dispositivo de proteção eletrônico capaz de identificar o desequilíbrio de corrente ou a ausência de uma ou mais fases no motor em qualquer parte do circuito, fazendo a interrupção do seu funcionamento.

1.4 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral desta monografia, pode-se citar os seguintes objetivos específicos:

- Estudo a respeito dos efeitos causados pelo desbalanceamento de corrente;
- Levantamento dos dados do comportamento do motor perante às falhas;
- Simulação do circuito proposto para o dispositivo;
- Montagem física do circuito simulado;
- Testes com o dispositivo junto ao motor de indução trifásico.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é dividida em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma breve introdução do que será proposto, juntamente com o contexto, a justificativa e os objetivos gerais e específicos. O capítulo 2 aborda o referencial teórico, no qual são apresentados os conhecimentos teóricos e conceituais que fundamentam o estudo realizado. No capítulo 3 tem-se a metodologia empregada, na qual apresenta o dispositivo desenvolvido e descreve com detalhes os testes, montagem e funcionamento do dispositivo. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta a conclusão geral do Trabalho de Conclusão de Curso. Por fim, o capítulo 6 apresenta as propostas de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico serão apresentados os principais estudos que sustentam o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Ele enfatiza os conceitos relacionados às características do motor de indução trifásico, o desbalanceamento de tensão e suas principais consequências, a análise do desbalanceamento de corrente e suas principais consequências, bem como a proteção contra as falhas causadas por desbalanceamento de tensão e corrente.

2.1 Principais características dos Motores de Indução Trifásicos

Os motores de indução são máquinas com excitação única (KOSOW, 1982). Nos motores de corrente contínua, tanto o estator quanto o rotor precisam ser alimentados eletricamente. Em contraste, nos motores de indução, apenas o estator é alimentado. O rotor recebe energia por indução eletromagnética, o que dá origem ao nome "motores de indução" (FRANCISCO, 2006). Esses rotores podem ser do tipo gaiola de esquilo e ou do tipo bobinado (CHAPMAN, 2013).

A frequência da corrente induzida no condutor é determinada pela velocidade do rotor. A relação entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente na armadura resulta em uma distribuição de corrente estacionária em relação ao campo magnético. Assim, a máquina de indução com excitação única pode produzir torque a qualquer velocidade abaixo da síncrona, sendo classificada como uma máquina assíncrona (DEL TORO, 1994).

Para os motores de indução é necessário que tanto a corrente de magnetização como a componente de potência da corrente circulem na mesma rede. Ademais, com a presença de um entreferro no circuito magnético, um valor estimável de corrente de magnetização é necessário para estabelecer o fluxo por pólo solicitado pela tensão aplicada (DEL TORO, 1994).

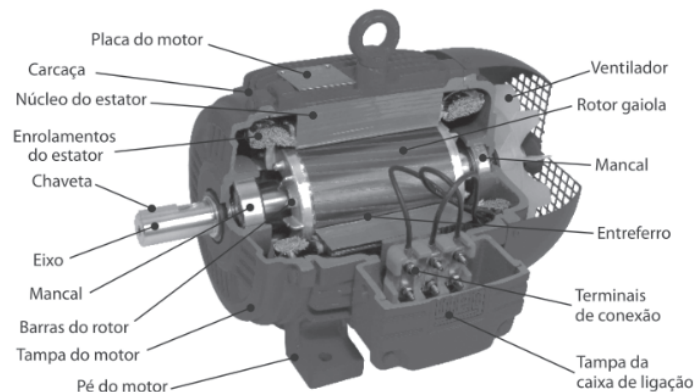
Nos tópicos a seguir serão apresentados mais detalhes das partes constituintes do motor de indução, bem como seu funcionamento e falhas.

2.1.1 Partes Constituintes

O motor de indução trifásico é constituído pelos seguintes elementos mostrados na Figura 3. Sua formação é basicamente composta pelo estator e pelo rotor (SILVA, 2014).

O estator é a parte fixa de um motor, no qual fica preso à carcaça. Nos motores, sua função é conduzir a energia elétrica para rotacionar o rotor (SILVA, 2014). Em motores de indução trifásicos, o estator é constituído basicamente pela parte ativa (núcleo magnético e enrolamentos), carcaça e a caixa de terminais (ALMEIDA, 2004).

Figura 3 - Partes constituintes do motor de indução trifásico.

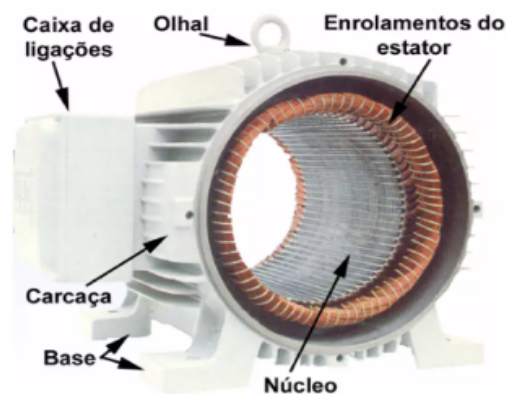


Fonte: SANTOS *et al*, 2007.

A parte ativa é formada pelos enrolamentos e o núcleo magnético (ALMEIDA, 2004). O núcleo é constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si (FRANCISCO, 2006). Estas chapas têm ranhuras onde são colocados os enrolamentos que são defasados de 120° no espaço pelo qual circulam as correntes alternadas defasadas de 120° (PAIVA, 2022).

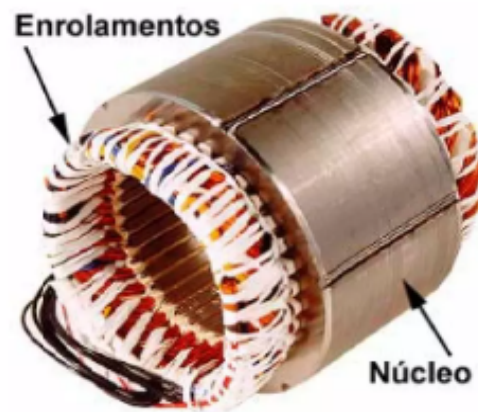
O conjunto é montado dentro de uma carcaça de ferro, aço ou alumínio, que possui uma base resistente, impossibilitando a locomoção do motor no momento da operação. Para facilitar a instalação dos condutores conectados à rede, a caixa de terminais é fixada à carcaça (ALMEIDA, 2006), (FRANCISCO, 2006). A Figura 4 e a Figura 5 apresentam a disposição dos elementos do estator e a parte ativa, respectivamente.

Figura 4 - Estator.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

Figura 5 - Parte ativa do estator.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

O rotor é o componente de uma máquina que gira em torno de seu próprio eixo, gerando movimentos de rotação (SILVA, 2014). Ele é composto pelo núcleo magnético, pelo eixo e, dependendo do tipo de rotor, por enrolamentos ou barras condutoras curto-circuitadas que possibilitam o fluxo da corrente elétrica (ALMEIDA, 2004).

O núcleo magnético consiste em um cilindro de aço laminado, onde condutores de cobre ou alumínio fundido são colocados em ranhuras ao longo do eixo. Esses condutores não necessitam de isolamento do núcleo, pois as correntes induzidas no rotor preferencialmente seguem o caminho de menor resistência, que são os condutores de cobre, alumínio fundido ou liga de cobre dos enrolamentos do rotor (KOSOW, 1982).

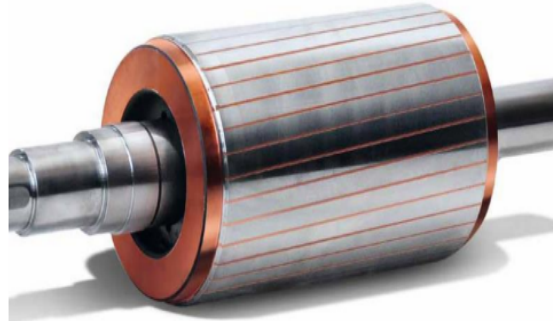
O eixo é a peça mecânica que sustenta a parte ativa do rotor e também permite acoplar o motor à carga a ser acionada (ALMEIDA, 2004). No rotor, a forma construtiva do seu enrolamento determina se o rotor é gaiola de esquilo ou bobinado (UMANS, 2014).

O rotor do tipo gaiola de esquilo é composto por uma série de barras condutoras inseridas em ranhuras na superfície do rotor, que são conectadas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito, por onde percorrerá a corrente induzida pelo campo girante (PAIVA, 2022), (SILVA, 2014). As barras do rotor podem ser levemente inclinadas, de forma a reduzir o ruído durante o funcionamento e produzir um torque mais uniforme (KOSOW, 1982).

Uma vantagem do rotor gaiola de esquilo é que devido a sua simplicidade e robustez, suportam maiores sobrecargas, uma vez que as barras da gaiola não se desfazem com facilidade, fazendo dele o tipo de rotor mais utilizado. Entretanto, a corrente induzida depende, exclusivamente, da intensidade do campo girante, uma vez que não possibilita variação no valor da resistência elétrica da gaiola (PAIVA, 2022), (UMANS, 2014).

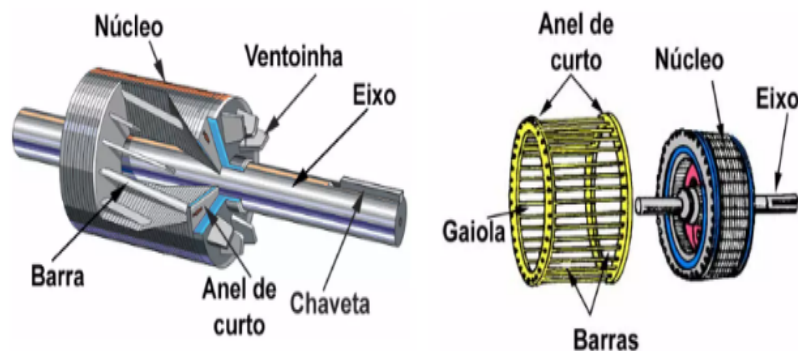
A Figura 6 mostra o rotor gaiola de esquilo e a Figura 7 indica a localização dos componentes.

Figura 6 - Rotor gaiola de esquilo.



Fonte: PAIVA, 2022.

Figura 7 - Disposição dos elementos do rotor gaiola de esquilo.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

O motor trifásico com rotor bobinado foi projetado para atender o requisito de partidas suaves na indústria (NASCIMENTO JUNIOR, 2011). Este rotor contém um conjunto de enrolamentos trifásicos semelhantes aos do estator (UMANS, 2014). As três fases desses enrolamentos são normalmente ligadas em estrela e suas extremidades são conectadas a anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por escovas que fazem contato com os anéis deslizantes (CHAPMAN, 2013).

Uma vantagem do rotor bobinado é que é possível ter acesso ao seu circuito elétrico, sendo possível inserir resistências externas para o controle de velocidade (ALMEIDA, 2004). Em contrapartida, máquinas com este tipo de rotor são relativamente incomuns, com alto custo inicial e de manutenção e sendo mais propenso a queima por sobrecarga (KOSOW, 1982), (PAIVA, 2022), (UMANS, 2014).

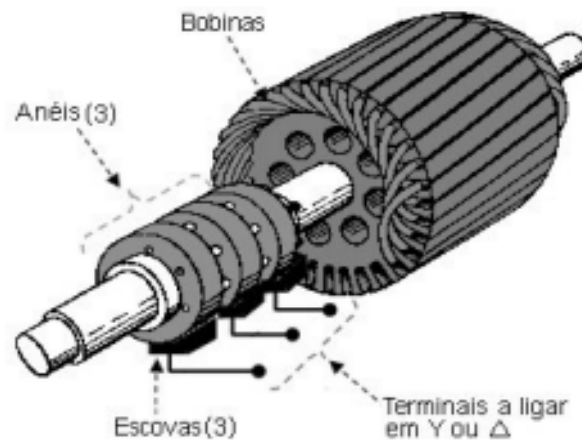
A Figura 8 mostra o rotor bobinado e a Figura 9 indica a localização dos componentes.

Figura 8 - Rotor bobinado.



Fonte: PAIVA, 2022.

Figura 9 - Elementos de rotor bobinado.

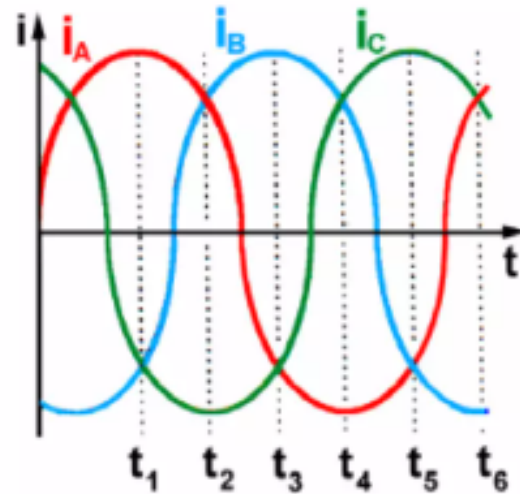


Fonte: FRANCISCO, 2006.

2.1.2 Princípio de Funcionamento

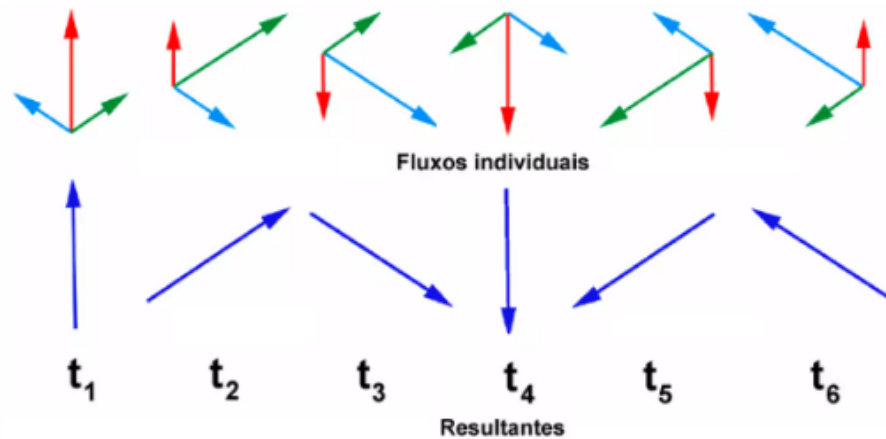
O motor de indução trifásico é uma máquina elétrica de corrente alternada composta basicamente pelo circuito do estator e pelo circuito do rotor. Quando os enrolamentos do estator são alimentados com uma tensão alternada trifásica, ocorrerá a circulação de correntes defasadas em 120° no tempo. Devido a disposição das bobinas no estator estarem, fisicamente, em 120° uma em relação à outra, a corrente em cada bobina produzirá um fluxo magnético, cujo sentido e intensidade dependem da corrente elétrica e da localização física da bobina. Como os três fluxos operam na mesma região do espaço, a interação entre eles produzirá um fluxo magnético resultante (ALMEIDA, 2004), (GUEDES, 1994). A Figura 10 apresenta as formas de onda das correntes em vários instantes e a Figura 11 mostra os fluxos individuais e resultantes em cada instante.

Figura 10 - Ondas de correntes em cada instante.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

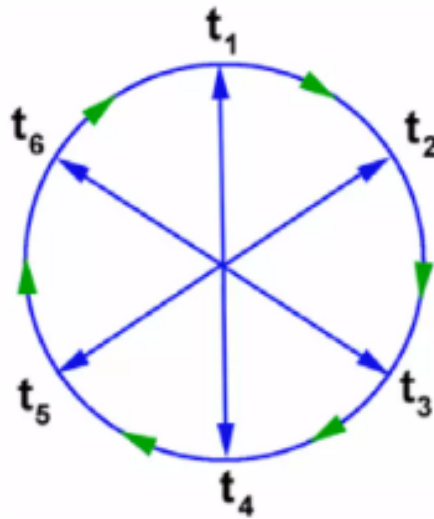
Figura 11 - Fluxos individuais e resultantes em cada instante.



Fonte: ALMEIDA, 2004

A partir das Figuras 10 e 11 observa-se que, em cada instante de tempo, o campo resultante ocupa uma posição diferente no espaço. Devido a sua amplitude ser constante, o lugar geométrico representado pelas resultantes é dado a cada ciclo (ALMEIDA, 2004). Logo, um campo magnético girante é criado, o qual circula na área do entreferro à velocidade de sincronismo (FRANCISCO, 2006), (GUEDES, 1994). Este campo criado, ao atravessar os condutores do rotor, induz tensões, de acordo com os princípios da lei da Indução Eletromagnética de Faraday (ALMEIDA, 2004). A Figura 12, ilustra o comportamento do campo magnético girante.

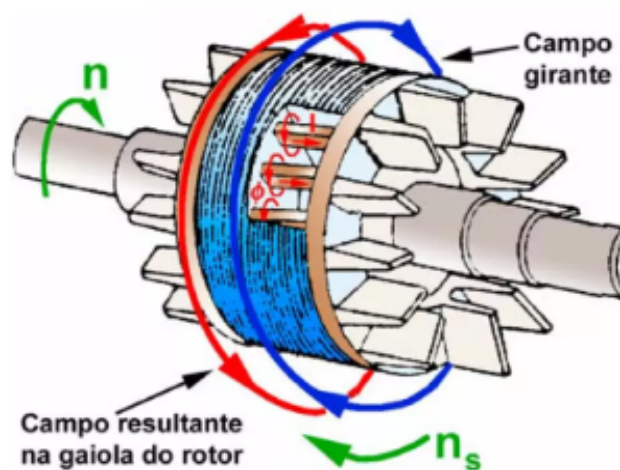
Figura 12 - Campo magnético girante.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

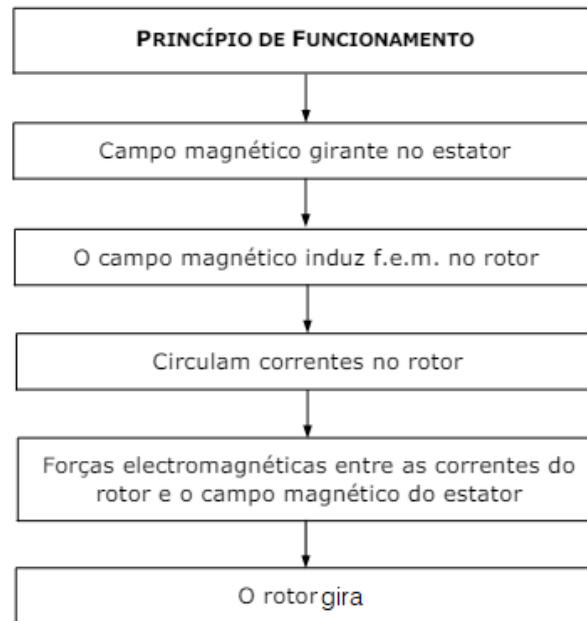
Os condutores do rotor, por estarem em um circuito fechado, são percorridos por correntes induzidas quando expostos a um campo magnético variável, conforme definido pela Lei de Lenz. Essas correntes induzidas, possuem um sentido que, por meio de seus efeitos magnéticos, atua para se opor à mudança que as gerou (FRANCISCO, 2006). A partir da interação entre os dois campos, aparecerá um conjugado que criará o movimento rotacional do eixo (PAIVA, 2022). A Figura 13 e a Figura 14 apresentam o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, de forma ilustrativa e de forma esquemática, respectivamente.

Figura 13 - Funcionamento do MIT.



Fonte: ALMEIDA, 2004.

Figura 14 - Fluxograma do funcionamento do MIT.



Fonte: FRANCISCO, 2006.

No entanto, o rotor nunca consegue alcançar exatamente a velocidade do campo magnético girante do estator. A diferença entre a velocidade do campo magnético do estator (velocidade síncrona) e a velocidade real do rotor é chamada de escorregamento. O escorregamento é de extrema importância para a indução de corrente no rotor, pois, sem ele, não haveria diferença relativa de movimento e, portanto, nenhuma corrente induzida e, conseqüentemente, o torque seria nulo (ALMEIDA, 2004).

2.1.3 Principais falhas dos Motores de Indução Trifásicos

Apesar de serem bem construídas e robustas, as máquinas rotativas estão sujeitas a falhas incipientes que são inevitáveis. Essas falhas iniciais podem comprometer o desempenho das máquinas antes que problemas mais graves se manifestem (BRITO, 2002).

Os motores frequentemente são expostos a condições que excedem suas características nominais de serviço, podendo enfrentar ambientes agressivos, operações inadequadas, defeitos de fabricação e até mesmo falhas provenientes da concessionária. Desse modo, quando operam além dos parâmetros projetados, há um risco substancial de falhas (BRITO, 2002), (BULGARELLI, 2006). A Tabela 1 apresenta os tipos e taxas de falhas em motores de indução trifásicos industriais.

Tabela 1 - Tipos e taxas de falhas ocorridas em motores trifásicos industriais.

Tipo de falha em motores de indução trifásicos industriais	Taxa de falha
Falhas em mancais	41%
Falhas no estator	37%
Falhas no rotor	10%
Outros tipos de falhas	12%

Fonte: BULGARELLI, 2006.

Dentro desses tipos, estas falhas podem ser (BULGARELLI, 2006):

- Provenientes do motor: Falhas de mancais e mecânicas;
- Devido à carga: Sobrecarga e subcarga;
- Devido ao ambiente: Umidade;
- Devido ao sistema de potência: Falta de fase e desbalanceamento de fase proveniente do desequilíbrio do sistema;
- Causado pela operação: reversão rápida do sentido de rotação.

Em função do objetivo deste trabalho, será dado enfoque às falhas relacionadas ao desequilíbrio de corrente, que são a falta de fase e o desbalanceamento de tensão. Estes tipos de falhas afetam o estator, no entanto, devido ao princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, onde as tensões e correntes do rotor são geradas através da indução magnética, suas consequências também podem se refletir ao rotor, causando rompimento de barras do rotor do tipo gaiola ou a queima de espiras do rotor bobinado.

Para que um sistema elétrico com cargas trifásicas e monofásicas seja considerado equilibrado, as correntes devem ser balanceadas. No caso de cargas monofásicas, o equilíbrio é alcançado quando essas cargas são distribuídas uniformemente entre as fases, de modo que a corrente no ponto comum seja nula. No entanto, em um sistema elétrico real, cargas monofásicas e trifásicas coexistem e interagem, tornando impossível prever quais cargas estarão ativas em determinado momento (PAULILO, 2013).

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico em regime permanente acontece quando os fasores das tensões apresentam variações na magnitude, no ângulo, ou ambas as situações juntas, conforme ilustra a Figura 15. Dessa forma, existem várias combinações possíveis de desequilíbrio de tensão (NASCIMENTO, 2016). Dois tipos importantes de desequilíbrio em uma rede elétrica são o desequilíbrio estrutural e o desequilíbrio funcional (LIMA, 2016). O desequilíbrio estrutural, que é quase constante, resulta das características físicas dos equipamentos e das linhas instaladas, provocando um

desequilíbrio no sistema mesmo quando as cargas e correntes são perfeitamente equilibradas. Em contraste, o desequilíbrio funcional ocorre de maneira aleatória devido à conexão de cargas monofásicas, que apresentam ciclos de demanda variáveis (ALVES, 2022).

Figura 15 - Desequilíbrio de tensão em módulo e ângulo.



Fonte: TAVARES, 2014.

O desbalanceamento extremo em um motor de indução pode ocorrer quando uma das fases é interrompida, independente do motivo da interrupção, transformando uma alimentação trifásica em uma alimentação bifásica, resultando na chamada falta de fase. Nesta situação, o motor gera um fluxo girante em sentido contrário à rotação normal do rotor. Esse fluxo reverso, provocado pela falta de fase, induz uma corrente no rotor com uma frequência próxima a 120 Hz, devido ao pequeno escorregamento presente (GONÇALEZ, 2007), (HERINGER, 2017).

O tempo máximo em que um motor pode operar sem uma fase está diretamente relacionado à sua capacidade de suportar essa condição sem sofrer danos. Se o motor não estiver em funcionamento e ocorrer uma falta de fase, ele não conseguirá dar partida e, como já foi dito, as correntes no estator assumirão valores muito maiores que os valores nominais. Entretanto, quando o motor já está em movimento e ocorre uma falta de fase, este sofre uma desaceleração súbita devido à incapacidade de gerar torque suficiente, resultando em queda na rotação devido à capacidade estar abaixo do torque nominal. Os motores trifásicos apresentam uma queda brusca na faixa de operação quando falta uma fase, geralmente entre 40% e 60% da capacidade nominal. Durante essa situação, há um aumento considerável na corrente (GONÇALEZ, 2007), (HERINGER, 2017).

2.2 Desbalanceamento de Tensão em Motores de Indução Trifásicos

O desbalanceamento de tensão é um problema comum em sistemas elétricos trifásicos, que pode afetar significativamente o desempenho e a longevidade dos motores de indução trifásicos. Nos tópicos seguintes, serão discutidas as principais causas desses desbalanceamentos e suas consequências para os motores de indução trifásicos, abordando como essas irregularidades podem comprometer a eficiência, aumentar o desgaste e, até mesmo, causar falhas graves nos motores. Além disso, serão abordados os métodos de quantificação do desequilíbrio de tensão, analisando e comparando qual deles melhor se ajusta aos limites recomendados.

2.2.1 Principais causas do Desbalanceamento de Tensão

A principal causa de desbalanceamento de tensão está nos sistemas de distribuição e de transmissão. Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, os desequilíbrios de tensão são majoritariamente causados pela distribuição desigual de cargas trifásicas e monofásicas entre as fases, que variam continuamente devido à adição e remoção de cargas. Na transmissão, os desequilíbrios são principalmente decorrentes da distribuição das fases ao longo de grandes distâncias, com irregularidades na transposição das linhas e disposição física assimétrica (PAULILO, 2013).

Um ponto adicional a ser destacado é o uso frequente de transformadores monofásicos, algo comum em concessionárias que operam com sistemas de distribuição primária de quatro fios e neutro aterrado. Transformadores monofásicos são conectados a cada fase para atender a cargas monofásicas, como residências e iluminação pública. As variações nessas cargas geram correntes desiguais nos condutores das três fases, levando a quedas de tensão desbalanceadas e resultando em desequilíbrios (TEODORO, 2005).

Além dos transformadores monofásicos, os transformadores trifásicos também apresentam problemas para o sistema, uma vez que devido às variações magnéticas inerentes à sua construção, estes geram correntes de magnetização ligeiramente distintas em cada uma das três fases (TEIXEIRA, 2019). Nessas circunstâncias, uma conexão em estrela com neutro isolado resulta em tensões de fase consideravelmente desbalanceadas. Esse problema é reduzido quando o secundário é conectado em triângulo (TEODORO, 2005).

Mesmo os equipamentos trifásicos podem ter algum nível de desequilíbrio individual, embora projetados para serem equilibrados. Com o somatório desses desequilíbrios

individuais, pode haver um aumento do desequilíbrio geral de uma rede ou sistema elétrico (PAULILO, 2013). No setor industrial, o uso de fornos elétricos trifásicos a arco é uma das principais fontes de desequilíbrio. Durante o processo de fusão e refinamento, a carga elétrica aplicada gera variações nos carregamentos entre as fases, originando correntes desequilibradas que resultam em grandes disparidades nas tensões elétricas (BENETELI, 2015). Um exemplo adicional de equipamento desequilibrado é um motor com impedância desbalanceada, devido ao aumento não uniforme de aquecimento no estator (FERREIRA FILHO, 2008).

Além destes inúmeros fatores que causam desequilíbrio de tensão, ainda podem ocorrer anomalias no sistema, sendo causas significativas de desequilíbrios, podendo alcançar níveis de até 5%. Entre essas anomalias estão falhas na isolação de equipamentos, podendo causar curto-circuito e fuga de corrente, rompimento de condutores, fazendo a interrupção do fluxo normal da eletricidade, e a abertura de fusíveis em uma das fases de um banco de capacitores, alterando a distribuição de cargas entre as fases do sistema elétrico (TEIXEIRA, 2019).

2.2.2 Consequências do Desbalanceamento de Tensão

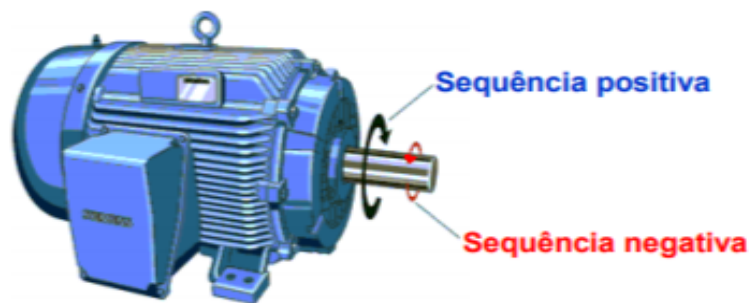
Os efeitos de uma alimentação trifásica desequilibrada podem se manifestar, sobretudo, como redução da potência útil nos processos de conversão eletromecânica e na operação inadequada de equipamentos e sistemas. Desequilíbrios significativos podem comprometer gravemente o desempenho operacional de muitos equipamentos, levando-os à falha. Assim, os desequilíbrios terão reflexos diretos nos custos operacionais dos equipamentos e sistemas elétricos, podendo ocasionar grandes prejuízos financeiros devido ao aumento das perdas, interrupções dos processos e danos aos equipamentos (BENETELI, 2015).

Com o desequilíbrio de tensão nos motores de indução ocorre a distorção do campo magnético girante, levando a uma operação semelhante àquela com um entreferro não uniforme. Isso resulta, inevitavelmente, em esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, causando vibrações, ruídos, batimentos, desgastes e aquecimento excessivo dos mancais, devido às correntes parasitas que aparecem no sistema eixo-mancal-terra (TEIXEIRA, 2019).

A distorção do campo magnético girante é causada pela combinação dos campos de sequência positiva e negativa. O campo de sequência positiva atua como um campo normal, enquanto o campo de sequência negativa se opõe a ele, conforme ilustra a Figura 16, gerando

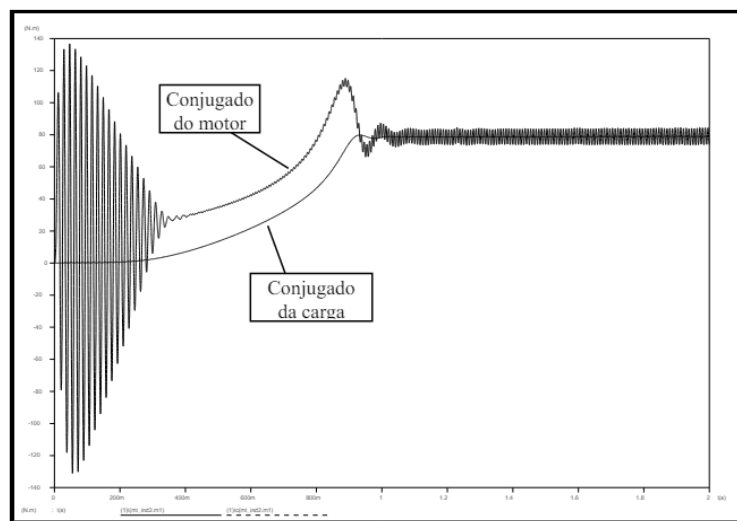
o desequilíbrio magnético do motor e, conseqüentemente, fazendo com que o torque total produzido pela máquina diminua (PAULILO, 2013). Logo, ocorre uma interação indesejada entre os dois campos, provocando um conjugado pulsante no eixo da máquina (OLESKOVICZ, 2007). A Figura 17 exibe a curva do conjugado da carga e a curva do conjugado desenvolvido por um motor de indução, quando alimentado por tensões desbalanceadas.

Figura 16 - Oposição entre os campos de seqüência positiva e negativa.



Fonte: TEIXEIRA, 2019.

Figura 17 - Desequilíbrio de tensão em módulo e ângulo.



Fonte: OLESKOVICZ, 2007.

O desbalanceamento de tensão nos MITs (Motores de Indução Trifásicos) pode causar outros problemas, como (MEDEIROS, 2015), (SANTOS; SILVA, 2013), (SEVERO, 2020):

- Aumento na corrente de magnetização, que reduz o fator de potência;
- Mudanças no tempo de partida dos motores;
- Redução da eficiência devido ao aumento das perdas;
- Variações na velocidade, que dependem da frequência e da tensão.

2.2.3 Métodos de quantificação de desequilíbrios de tensão

Para avaliar o desequilíbrio de tensão em redes elétricas, é preciso determinar o fator de desequilíbrio de tensão (LIMA, 2016). Nesse sentido, existem quatro métodos de quantificação amplamente reconhecidos e utilizados internacionalmente. Os métodos NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) utilizam apenas os módulos dos valores de tensão. Já o método das componentes simétricas, baseado no teorema de Fortescue, decompõe o sistema trifásico em três sistemas equilibrados, exigindo tanto os módulos quanto os ângulos das tensões de fase. O método CIGRÈ oferece resultados similares aos das componentes simétricas, mas calcula o desequilíbrio usando apenas os módulos das tensões de linha (BENETELI, 2015). A seguir, esses métodos serão detalhados e comparados de acordo com as normas estabelecidas.

2.2.3.1 Método da NEMA

A norma NEMA - MG - 14.34, define o fator de desequilíbrio através da relação entre o máximo desvio da tensão média de linha com a tensão média de linha (BENETELI, 2015), conforme a equação (1).

$$FD = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

FD - fator de desequilíbrio em percentual;

ΔV - Máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio;

V_m - Valor médio das tensões de linha.

2.2.3.2 Método do IEEE

O método do IEEE define que o fator de desequilíbrio seja obtido pela razão entre a diferença entre os valores de máximo e mínimo da tensão, com a média da tensão (LIMA, 2016), de acordo com a expressão (2).

$$FD = \frac{3 \cdot (V_{max} - V_{min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

FD - fator de desequilíbrio em percentual;

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - Módulo das tensões de linha trifásica;

V_{max} - Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_{min} - Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas.

2.2.3.3 Método das componentes simétricas

O Teorema de Fortescue afirma que (KINDERMANN, 1997, p. 34):

“Um sistema de "n" fasores desequilibrados pode ser decomposto em "n" sistemas de fasores equilibrados”.

Desse modo, quando se aplica esse conceito a um sistema trifásico desequilibrado, ao se decompor, ele é dividido nas componentes simétricas de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero (TORREZAN, 2018). Com isso, segundo o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2020), o fator de desequilíbrio é obtido através da razão entre os módulos das sequências negativa e positiva, como mostra a expressão (3).

$$FD = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (3)$$

Onde:

FD - fator de desequilíbrio em percentual;

V_- - Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS);

V_+ - Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS).

2.2.3.4 Método de CIGRÉ

Como forma alternativa para o método das componentes simétricas, o módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2020), cita o método de CIGRÉ (*Congress Internationale des Gran Réseaux Électriques a Haute Tension*), o qual apresenta resultados em consonância. No entanto, este método calcula o fator de desequilíbrio com base em grandezas adimensionais relacionadas às tensões de linha conforme mostra as equações (4) e (5), diferentemente do método das componentes simétricas.

$$FD = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (5)$$

Onde:

FD - fator de desequilíbrio em percentual;

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - Módulo das tensões de linha.

2.2.3.5 Limites recomendados e comparação entre os métodos

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), que é a agência reguladora do setor elétrico no Brasil, estabelece padrões de qualidade para a energia fornecida pelas concessionárias. Esses padrões incluem parâmetros e limites máximos e mínimos, e são detalhados no PRODIST. No Brasil, utiliza-se o método das componentes simétricas e, alternativamente, o do CIGRÉ, para determinar o fator de desequilíbrio de tensão, conforme recomendado no PRODIST (ANEEL, 2020). A Tabela 2 apresenta os limites de fator de desequilíbrio de tensão desses dois métodos.

Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão do método do CIGRÉ e das componentes simétricas estabelecidos pelo PRODIST.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ Kv}$	$1,0 \text{ Kv} < V_n < 230\text{kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: ANEEL, 2020.

A Tabela 3 mostra os limites de desequilíbrio de tensão estabelecidos por outras normas em diversos países.

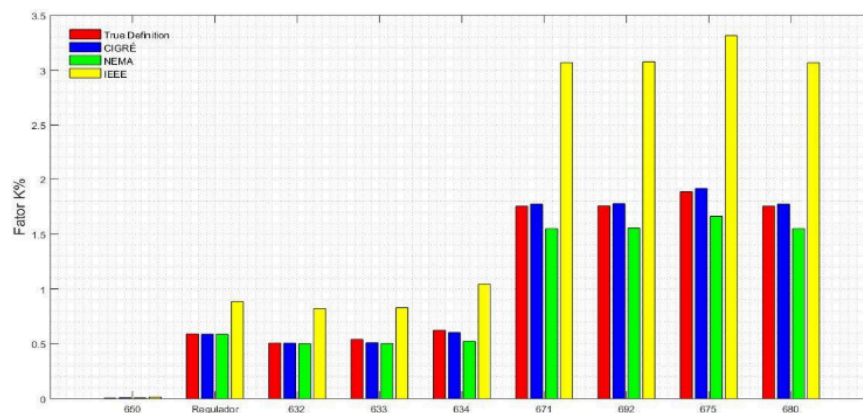
Tabela 3 - Limites para os desequilíbrios de tensão em diferentes normas.

Norma	Limite
NEMA MG 1 14-34 (1)	2%
ANSI C.84.1-1989 (2)	3%
IEEE Orange Book - 446/1995 (3)	2,5%
GTCP/CTST/GCPS - ELETROBRÁS (4)	1,5% e 2%
ONS e ANEEL	2%

Fonte: PAULILO, 2013.

Com o intuito de compreender melhor o desequilíbrio de tensão, Torrezan *et al.* (2018), implementou uma simulação no *software OpenDSS*, a fim de analisar e comparar os resultados dos quatro métodos de quantificação de desequilíbrio em um sistema de distribuição do IEEE de 13 barras. Nesse sentido, analisando a Figura 18, foi visto que os métodos de CIGRÉ e das componentes simétricas (também conhecido como “TD”), não ultrapassaram o limite de desequilíbrio de tensão de 2% estabelecido no Brasil em todas as barras trifásicas, apresentando valores semelhantes. Em contrapartida, o método do IEEE foi o que apresentou maiores valores, mantendo este comportamento em todas as barras.

Figura 18 - Comparação entre os 4 métodos de quantificação utilizando o *software OpenDSS*.



Fonte: TORREZAN et al., 2018.

Analogamente, para compreender e comparar melhor os quatro métodos de quantificação de desequilíbrio, Lima (2016) utilizou-se de um exemplo com dados de uma rede elétrica hipotética para calcular o fator de desequilíbrio das diferentes metodologias. Neste caso, para o cálculo do erro percentual, foi tomado como referência o método das componentes simétricas. A Tabela 4 apresenta todos os valores obtidos.

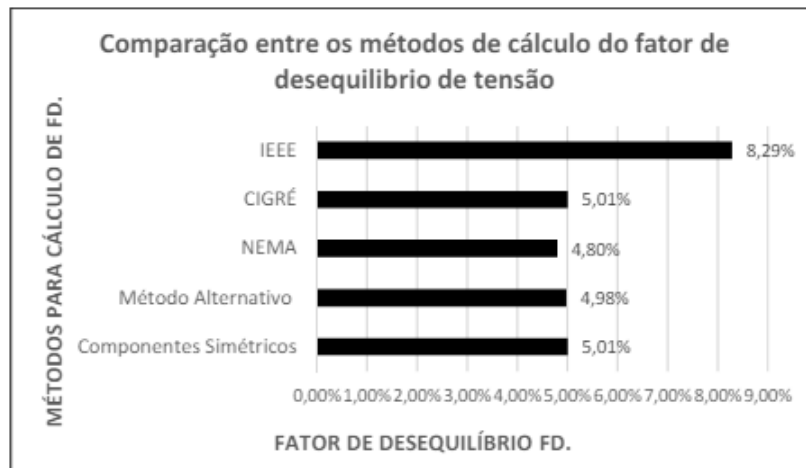
Tabela 4 - Valor calculado do desequilíbrio de tensão para os quatro métodos.

Método Utilizado	Fator de Desequilíbrio (FD)	% Erro
Componentes simétricas	5,01%	0,00%
Alternativo	4,98%	-0,59%
NEMA	4,8%	-4,19%
CIGRÉ	5,01%	0,04
IEEE	8,29%	65,46%

Fonte: Adaptado de LIMA, 2016.

Com base nos valores obtidos na Tabela 1, conclui-se que todos os métodos resultaram em valores distintos do valor de referência calculado pelo método das componentes simétricas. O método CIGRÉ gerou um valor muito próximo ao obtido pelas componentes simétricas. Por outro lado, o método NEMA produziu um valor 4,19% menor, enquanto o método IEEE apresentou a maior discrepância, com um valor 65,46% maior. A Figura 19 mostra o resultado de todos os métodos.

Figura 19 - Comparação entre os métodos de cálculo de desequilíbrio de tensão.



Fonte: LIMA, 2016.

Portanto, diante das análises feitas por Torrezan *et al.* (2018) e Lima (2016), conclui-se que entre os métodos discutidos, além do método das componentes simétricas, o método de CIGRÉ é o mais adequado para calcular o fator de desequilíbrio, sendo também recomendado pelo PRODIST de modo alternativo.

2.3 Desbalanceamento de Corrente em Motores de Indução Trifásicos

O desequilíbrio de tensão tem um impacto direto e significativo no desempenho dos motores de indução trifásicos, especificamente na forma como afeta o desequilíbrio de corrente e as consequências térmicas associadas. Nos próximos tópicos, será abordado o efeito do desequilíbrio de tensão para o aumento da corrente e, conseqüentemente, como esse aumento resulta em efeitos térmicos adversos nos motores de indução.

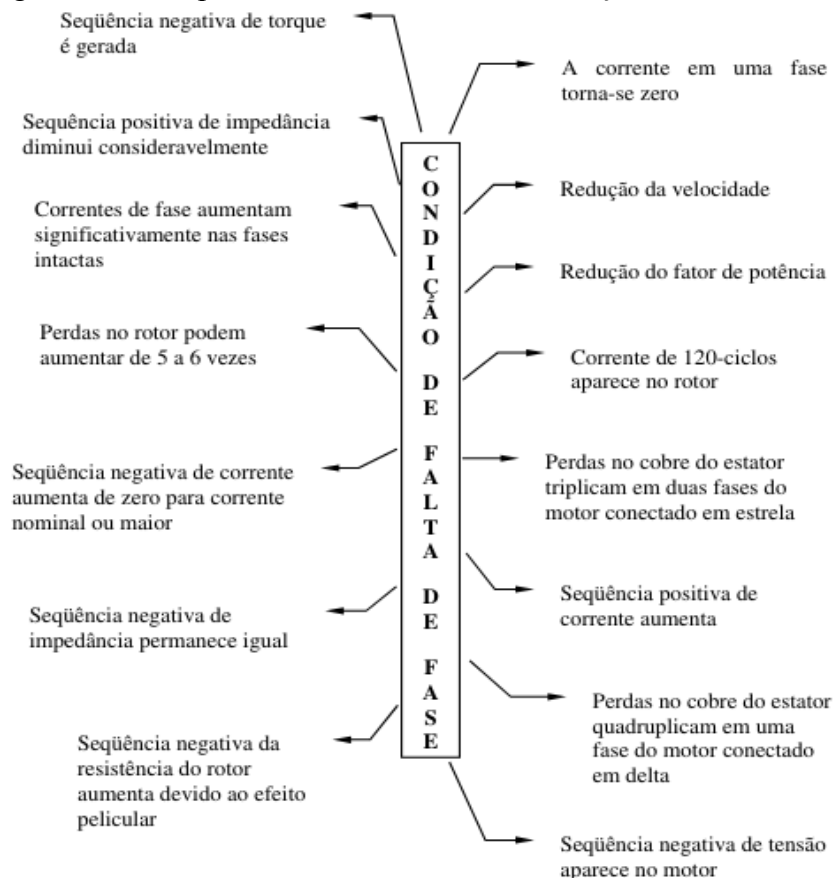
2.3.1 Efeito do desequilíbrio de tensão no aumento de corrente

Um desequilíbrio de tensão, mesmo que pequeno, pode levar a grandes desequilíbrios de corrente e a um aumento significativo na temperatura (BENETELI, 2015). Estudos indicam que um desequilíbrio de tensão de apenas 3,5% pode aumentar as perdas de um

motor de indução trifásico em 20%. Já um desequilíbrio de 5% ou mais pode rapidamente causar danos irreversíveis ao motor (REZENDE; SAMESIMA, 2013).

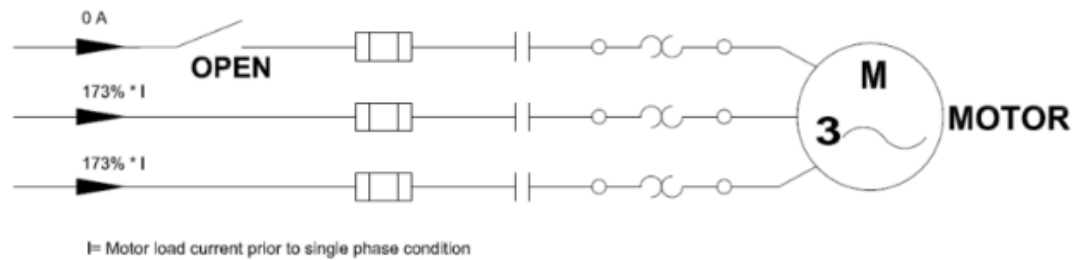
Quando há um desbalanceamento na tensão de alimentação, um motor de indução trifásico pode enfrentar várias adversidades. O desbalanceamento mais grave ocorre quando uma das fases dos condutores é interrompida, situação conhecida como falta de fase. Sem a proteção adequada, os motores podem ser danificados rapidamente, apresentando um comportamento conforme a Figura 20. Quando um motor operando a plena capacidade perde uma das três fases, ele tenta continuar gerando sua potência nominal, fazendo com que as fases restantes carreguem 173% da corrente original, como ilustrado na Figura 21 (*VOLTAGE DISTURBANCE*, 2021).

Figura 20 - Comportamento do motor sob condição de falta de fase.



Fonte: GONÇALEZ, 2007.

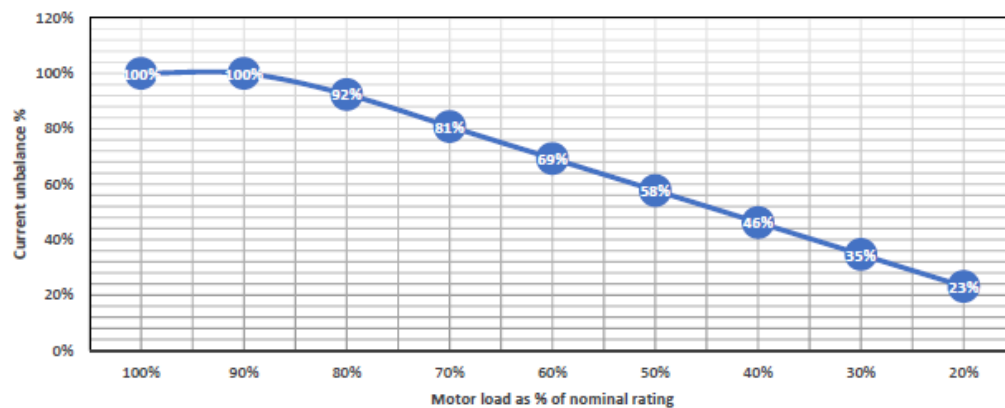
Figura 21 - Condição monofásica do motor.



Fonte: VOLTAGE DISTURBANCE, 2021.

Um possível cenário em que a proteção normal de sobrecarga do motor pode falhar na detecção de condições monofásicas ocorre quando o motor está levemente carregado. Por exemplo, se o motor estiver carregado apenas até 50%, a corrente do motor por unidade será de 0,5pu. As fases saudáveis verão apenas 0,865pu de corrente. Um disjuntor de sobrecorrente ou fusível classificado para FLA de 1 pu não desarmará. Nesse caso, um motor com 50% de carga e uma fase perdida resultará em um desequilíbrio de corrente de 58% (*VOLTAGE DISTURBANCE*, 2021). A Figura 22 mostra o desequilíbrio percentual de corrente para várias condições monofásicas.

Figura 22 - Corrente do motor durante condições monofásicas.



Fonte: VOLTAGE DISTURBANCE, 2021.

2.3.2 Efeito Térmico

As impedâncias de sequência negativa possuem valores muito baixos, resultando em um elevado desequilíbrio de corrente. Isso aumenta a temperatura do motor que, operando com uma certa carga e sob um determinado desequilíbrio, aquece mais do que operando sob essas mesmas condições sem o desequilíbrio de tensão (PAULILO, 2013). A Tabela 5 mostra que, quanto maior o desequilíbrio de tensão, maior será o desequilíbrio de corrente, sendo proporcional com o aumento da temperatura (TEIXEIRA, 2019).

Tabela 5 - Efeitos do desequilíbrio de tensão nos motores de indução trifásicos.

Característica	Desempenho		
	Tensão Média [V]	230	230
Desequilíbrio de Tensão [%]	0,3	2,3	5,4
Desequilíbrio de corrente [%]	0,4	17,7	40
Elevação de Temperatura [°C]	0	30	40

Fonte: TEIXEIRA 2019.

A degradação do isolamento dos enrolamentos de um motor é uma causa frequente de falhas e redução da vida útil desses equipamentos. Diversos fatores podem levar a essas consequências, incluindo a exposição dos enrolamentos à temperaturas superiores às especificadas para o isolamento (SANTOS; SILVA, 2013). As propriedades físicas e dielétricas do sistema de isolamento deterioram-se com o tempo e, como qualquer processo químico, essa deterioração é acelerada pelo aumento da temperatura (BULGARELLI, 2006).

A vida útil de um motor está diretamente ligada ao aquecimento excessivo das bobinas dos enrolamentos, que superam os limites de isolamento especificados pela fabricação. Testes e experiências mostram que, para cada aumento de 10°C na temperatura dos enrolamentos, a vida útil do isolamento é reduzida pela metade. Inversamente, a vida útil dobra para cada redução de 10° C. Portanto, a durabilidade do isolamento do motor depende de quanto tempo ele é mantido a uma determinada temperatura (BULGARELLI, 2006). Esse aquecimento acelera o envelhecimento do isolamento até que ele atinja seu limite de tensão, ocasionando um curto-circuito interno. A Equação (6) mostra como calcular a redução de vida útil nos motores com alimentação desequilibrada, partindo da elevação de temperatura provocada pelo desequilíbrio e a Tabela 6 mostra a aplicação da equação em diferentes pontos (REZENDE; SAMESIMA, 2013).

$$\lambda = \lambda_{nom} e^{\frac{E}{k} \left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{nom}(\theta_{nom} + \Delta\theta)} \right)} \quad (6)$$

Onde:

λ - Tempo de vida útil;

λ_{nom} - Tempo de vida útil nominal;

$\Delta\theta$ - Acréscimo de temperatura em °C;

θ_{nom} - Temperatura nominal do motor em °K.

Tabela 6 - Vida útil em motores.

Elevação de temperatura $\Delta\theta$ (°C)	Tempo de vida útil (Anos)	Redução de vida útil (%)
0	20	0
1	18,46	7,7
2	17,04	14,8
3	15,73	21,4
4	14,54	27,3
5	13,43	32,8
6	12,42	37,9
7	11,49	42,5
8	10,63	46,8
9	9,84	50,8
10	9,11	54,4
15	6,24	68,8
20	4,31	78,4

Fonte: REZENDE; SAMESIMA, 2013.

2.4 Proteções contra as falhas causadas por Desbalanceamento de Tensão e Corrente

Proteger motores de indução trifásicos contra falhas de desbalanceamento de tensão e corrente é crucial para garantir o desempenho e a durabilidade desses equipamentos. Desbalanceamentos podem ter consequências trágicas, resultando em sérios problemas e altos custos de manutenção. Nos próximos tópicos, serão explorados os dispositivos disponíveis no mercado para proteger os motores de indução, além das limitações e falhas desses dispositivos. Por fim, será apresentada uma proposta para ampliar e inovar a proteção dos MITs.

2.4.1 Dispositivos de Proteção existentes no mercado

Um dos dispositivos mais utilizados para proteção de motores elétricos é o relé de falta de fase. Ele é um dispositivo altamente utilizado na indústria, prevenindo danos que podem ocorrer devido à ausência de uma das fases do circuito de alimentação do motor (MATTEDE, 2016). O relé de falta de fase é composto por um circuito eletrônico de monitoramento, microprocessador, relé interno e um contato comutador. Para que ocorra a correta operação do motor, o relé recebe as três fases nos seus terminais de entrada, permitindo o funcionamento do circuito enquanto as três as fases na linha de alimentação do motor estiverem operando corretamente. Em caso de falha, ou seja, a falta de uma das fases, o microprocessador aciona o relé interno para interromper o circuito, desligando e protegendo o

motor. A sensibilidade do relé pode ser ajustada por um trimmer na parte frontal, permitindo a detecção de variações na tensão elétrica e garantindo que o circuito seja desativado conforme necessário para evitar danos (MATTEDE, 2016). A Figura 23 apresenta o relé de falta de fase RPW-FF da WEG.

Figura 23 - Relé de falta de fase.



Fonte: MATTEDE, 2016.

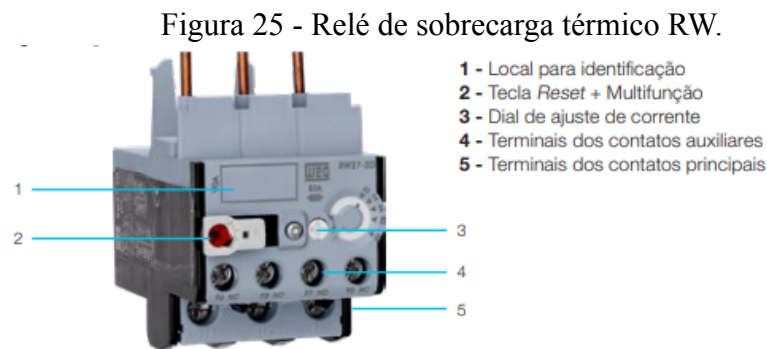
O relé de subtensão e sobretensão é projetado para monitorar as variações máximas e mínimas de tensão em um sistema trifásico. Sempre que ocorrer uma condição de subtensão ou sobretensão, o relé atuará para interromper a operação do motor ou processo monitorado. Ele pode desligar circuitos e acionar dispositivos de segurança e alarmes, protegendo motores, máquinas e equipamentos contra falhas na rede de alimentação, conforme os padrões ajustados. Isso garante que qualquer anomalia na tensão de alimentação seja detectada e corrigida, evitando danos maiores e garantindo a continuidade operacional. A Figura 24 exibe o relé descrito.

Figura 24 - Relé de subtensão e sobretensão.



Fonte: WEG, 2024.

Um outro dispositivo amplamente utilizado para a proteção de motores elétricos são os relés de sobrecarga. Estes protegem o motor contra o superaquecimento causado por sobrecargas ou elevações de corrente elétrica anormais. Quando há uma sobrecarga no motor, a corrente aumenta, acionando o mecanismo de disparo que ativa os contatos auxiliares (NF) e (NA). Esses contatos desligam a carga através de um contator. O tempo de desligamento depende da corrente de sobrecarga e da corrente ajustada no relé, conforme indicado na curva de disparo. Após o desligamento, é necessário aguardar o restabelecimento do sistema para rearmar o relé, o que pode ser feito de forma manual ou automaticamente (WEG, 2024). A Figura 25 apresenta o relé de sobrecarga térmica RW da WEG, bem como seus elementos funcionais.



Fonte: WEG, 2024.

Por fim, existe também o relé de monitoramento de sobrecorrente, que é um dispositivo que supervisiona a corrente elétrica em um condutor ou equipamento e reage se essa corrente ultrapassar um limite preestabelecido. Amplamente utilizado em diversas aplicações, esses relés fornecem proteção contra falhas elétricas, como curtos-circuitos e sobrecargas, que podem ser perigosas. Eles detectam quando a corrente excede um nível pré-estabelecido e, automaticamente, desconectam o circuito ou enviam um sinal a outro dispositivo de proteção. Composto por dois componentes principais, sendo um dispositivo sensor, que detecta a corrente no circuito e um dispositivo de controle, que define a corrente de disparo conforme as configurações do usuário (WILLIAM, 2022). A Figura 26 ilustra o relé de sobrecorrente.

Figura 26 - Relé de sobrecorrente.



Fonte: WILLIAM, 2022.

2.4.2 Problemas identificados nos dispositivos existentes

Embora os relés citados anteriormente sejam amplamente utilizados para a proteção de motores de indução trifásicos, eles apresentam algumas limitações.

O relé de falta de fase, é eficiente na detecção da ausência de fase, no entanto, uma vez que este relé deve ser instalado antes do contator de potência que alimenta o motor para funcionar corretamente, ele enfrenta dificuldades em detectar anormalidades no sistema após o ponto de sua instalação, por exemplo, na saída do contator, ou nas conexões do motor.

Os relés de sobrecorrente e sobrecarga monitoram exclusivamente a variável corrente elétrica, o que pode ser uma limitação em sistemas mais complexos. Esses relés detectam sobrecorrentes devido a curtos-circuitos ou sobrecargas prolongadas, mas não são projetados para identificar outros tipos de falhas, como subtensões e desbalanceamento de fases.

Portanto, apesar de sua ampla utilização e importância, é crucial reconhecer as limitações desses relés e considerar soluções complementares para uma proteção mais abrangente dos motores elétricos.

2.4.3 Proposta de solução dos problemas identificados

Com o objetivo de contornar as limitações dos dispositivos existentes no mercado, a proposta é desenvolver um equipamento que analise tanto a variável corrente quanto a variável tensão, unificando as funções de vários dispositivos em um só. O princípio de funcionamento deste dispositivo será baseado na variável corrente, já que em um circuito série a corrente é constante ao longo de todo o circuito, permitindo que o dispositivo também detecte desbalanceamentos após o ponto de instalação. Além disso, através da análise dos desequilíbrios de corrente, será possível identificar a origem desses desbalanceamentos, que estão relacionados com a variável tensão, podendo ser causados por desequilíbrios de tensão ou até mesmo pela falta de fase.

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Neste tópico, serão apresentados os métodos e as etapas detalhadas que levaram ao desenvolvimento do dispositivo de proteção final. Inicialmente, serão retratados os testes no motor para verificar seu comportamento diante das falhas de desbalanceamento de tensão, falta de fase e variação da corrente em função da resistividade. Em seguida, será abordada a ideia principal para a criação do dispositivo, incluindo seu princípio de funcionamento e a montagem final.

3.1 Testes no motor

Antes de iniciar o desenvolvimento do relé de desbalanceamento de corrente, foi fundamental compreender as causas e as consequências que afetam o motor de indução trifásico. Por isso, foram realizados testes de desbalanceamento de tensão tanto em configuração estrela quanto em triângulo, além de testes de falta de fase na partida e em regime de operação, com o motor em vazio. Estes testes permitiram observar as alterações na corrente elétrica, bem como o comportamento do motor na presença das falhas. A Tabela 7 apresenta os equipamentos utilizados para a realização dos testes, assim como suas respectivas funções.

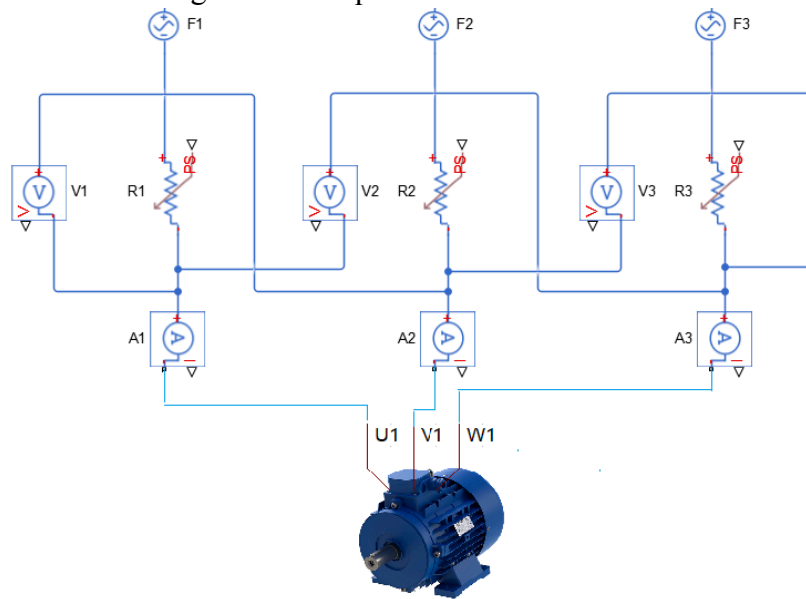
Tabela 7 - equipamentos utilizados para realização dos testes.

Quantidade	Equipamento	Função
1	Motor trifásico VOGES 1/4 CV 220/380V	Objeto de estudo para análise e monitoramento das falhas
6	Multímetro	Medição de tensão e corrente em cada fase
3	Reostato	Variação da tensão em cada fase
1	Painel didático	Fornecer alimentação trifásica

Fonte: Própria autora, 2024.

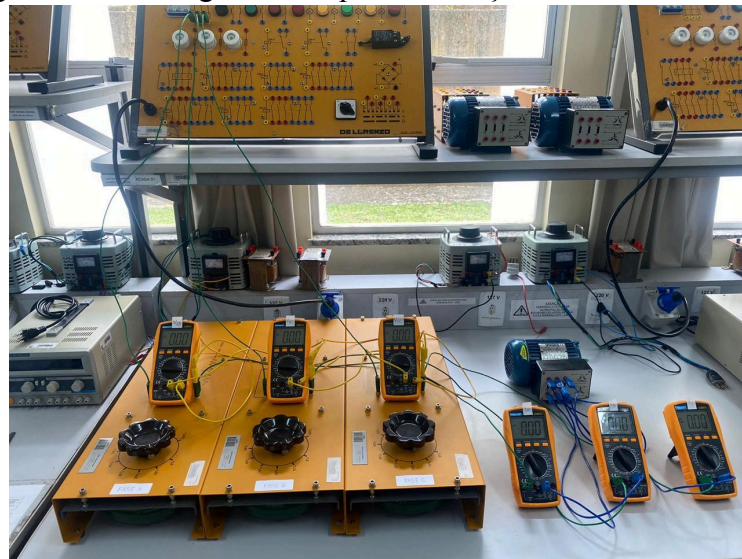
Para simular o desbalanceamento de tensão, foram conectados reostatos e amperímetros em série com cada fase do motor, e para monitorar esse desbalanceamento, foram instalados voltímetros em cada fase. A Figura 27 exhibe o esquemático das conexões e a Figura 28 mostra a montagem física para realização dos testes no motor.

Figura 27 - Esquemático das conexões.



Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 28 - Montagem física para realização dos testes no motor.



Fonte: Própria autora, 2024.

3.2.1 Teste de desbalanceamento de tensão

O primeiro teste realizado foi o de desbalanceamento de tensão. Durante esse teste, foram observados os valores de corrente nas configurações estrela e triângulo, enquanto a tensão de uma das fases era gradualmente reduzida em incrementos de 2 V, controlados pelo reostato. Cada teste foi repetido três vezes nas duas configurações, variando a tensão em uma fase por vez, e realizando 10 medições em cada ciclo.

A Tabela 8 apresenta o valor de corrente correspondentes a cada valor de tensão na fase B, quando em configuração estrela.

Tabela 8 - Desbalanceamento de tensão em ligação estrela, com variação na fase B.

VALORES DE CORRENTE PARA DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO (220 V)					
LIGAÇÃO ESTRELA (MOTOR EM VAZIO)					
VARIAÇÃO NA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
220	220	217	0,29	0,26	0,28
219	219	215	0,3	0,25	0,28
220	219	213	0,31	0,24	0,29
219	219	211	0,31	0,23	0,29
219	219	209	0,32	0,22	0,29
219	219	207	0,33	0,21	0,3
219	219	205	0,33	0,2	0,3
218	218	203	0,34	0,19	0,3
217	218	201	0,35	0,18	0,31
217	218	199	0,35	0,16	0,31

Fonte: Própria autora, 2024.

Ao realizar o mesmo teste para as fases A e C, foi calculada a média dos 10 valores de correntes medidos em cada fase e, em seguida, uma média geral, conforme mostra a Tabela 9. Esse valor resultou em 0,28 A, que não excede a corrente nominal do motor em conexão estrela, que é de 0,64 A.

Neste teste foi possível observar que as correntes nas fases sem o desequilíbrio de tensão não ficaram igualmente distribuídas, no entanto, um aspecto positivo é que não houve ruído nem aquecimento significativo do motor durante o tempo de duração do teste (cerca de 120 segundos).

Tabela 9 - Valores médios de corrente para as fases A, B e C e corrente média geral.

VALORES DE CORRENTE PARA TENSÃO BALANCEADA (220 V)					
LIGAÇÃO ESTRELA (MOTOR EM VAZIO)					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente média fase A	Corrente média fase B	Corrente média fase C
220	220	220	0,28	0,28	0,28
CORRENTE MÉDIA GERAL			0,28		

Fonte: Própria autora, 2024.

A Tabela 10 apresenta o valor de corrente correspondente a cada valor de tensão na fase B, mas dessa vez com conexão em triângulo.

Tabela 10 - Desbalanceamento de tensão em ligação triângulo, com variação na fase B.

VALORES DE CORRENTE PARA DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO (220 V)					
LIGAÇÃO TRIÂNGULO (MOTOR EM VAZIO)					
VARIAÇÃO NA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
221	220	217	1	0,87	0,95
221	220	215	1,02	0,83	0,96
221	220	213	1,05	0,78	0,98
221	220	211	1,06	0,75	0,98
221	220	209	1,08	0,72	0,99
221	219	207	1,1	0,69	1
220	219	205	1,11	0,66	1,01
220	219	203	1,13	0,62	1,02
220	219	201	1,15	0,59	1,03
219	219	199	1,16	0,57	1,05

Fonte: Própria autora, 2024.

Ao realizar o mesmo teste para as fases A e C, foi calculada a média dos 10 valores de correntes medidos em cada fase e, em seguida, uma média geral, conforme mostra a Tabela 11. Esse valor resultou em aproximadamente 0,95 A, o que não excede a corrente nominal do motor em configuração triângulo, que é de 1,11 A. Nesse caso, a média não é excedida, porém, ao observar os valores de corrente da fase A na Tabela 10, percebe-se que o valor nominal é ultrapassado, mas se encontra dentro do limite definido pelo Fator de Serviço de 1,15.

Neste teste, foi perceptível correntes mais elevadas, uma vez que as correntes em configuração triângulo são $\sqrt{3}$ vezes maior que em configuração estrela. Além disso, assim como no teste anterior, as correntes nas fases sem o desbalanceamento de tensão não ficaram igualmente distribuídas. Notou-se também uma pequena vibração, mas sem aquecimento significativo.

Tabela 11 - Valores médios de corrente para as fases A, B e C e corrente média geral.

VALORES DE CORRENTE PARA TENSÃO BALANCEADA (220 V)					
LIGAÇÃO TRIÂNGULO (MOTOR EM VAZIO)					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente média fase A	Corrente média fase B	Corrente média fase C
220	220	220	0,96	0,93	0,95
CORRENTE MÉDIA GERAL			0,947		

Fonte: Própria autora, 2024.

3.2.2 Teste de falta de fase

O segundo teste realizado foi o de falta de fase. Durante esse teste, observou-se os valores de corrente nas fases A, B e C, nas configurações estrela e triângulo, tanto na partida sem uma fase quanto em regime de operação. Diferentemente do primeiro teste, que utilizava um reostato para controlar a tensão, neste teste as fases foram completamente retiradas diretamente da bancada trifásica, analisando-se uma fase por vez.

A Tabela 12 apresenta os valores de corrente para a falta da fase B em regime de operação na configuração estrela, que também foram os mesmos para as outras fases. Nesta situação, a corrente não ultrapassou o valor nominal e o motor não apresentou aquecimento relevante durante o tempo de teste (aproximadamente 20 segundos).

Tabela 12 - Falta da fase B em regime de operação em ligação estrela.

VALORES DE CORRENTE PARA FALTA DE FASE EM REGIME DE OPERAÇÃO (220 V)					
LIGAÇÃO ESTRELA (MOTOR EM VAZIO)					
FALTA DA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
205	222	166	0,43	0	0,43

Fonte: Própria autora, 2024.

A Tabela 13 apresenta os valores de corrente para a falta da fase B em regime de operação na configuração triângulo, que também foram os mesmos para as outras fases. Nesta situação, a corrente ultrapassou o valor nominal, inclusive a corrente nominal no Fator de Serviço e o motor apresentou aquecimento moderado durante o tempo de teste (aproximadamente 20 segundos).

Tabela 13 - Falta da fase B em regime de operação em ligação triângulo.

VALORES DE CORRENTE PARA FALTA DE FASE EM REGIME DE OPERAÇÃO (220 V)					
LIGAÇÃO TRIÂNGULO (MOTOR EM VAZIO)					
FALTA DA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
206	221	165	1,42	0	1,42

Fonte: Própria autora, 2024.

A Tabela 14 apresenta os valores de corrente para a falta da fase B na partida, na configuração estrela, que foram os mesmos para as outras fases. Os valores foram obtidos após as correntes se estabilizarem. Nessa situação, o motor não partiu, a corrente ultrapassou o valor nominal e houve aquecimento moderado.

Tabela 14 - Falta da fase B na partida em ligação estrela.

VALORES DE CORRENTE PARA FALTA DE FASE NA PARTIDA (220 V)					
LIGAÇÃO ESTRELA (MOTOR EM VAZIO)					
FALTA DA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
108	221	111	1,32	0	1,32

Fonte: Própria autora, 2024.

A Tabela 15 apresenta os valores de corrente para a falta da fase B na partida, na configuração triângulo, que foram os mesmos para as outras fases. Esta situação foi a mais grave: o motor não partiu, a corrente se elevou significativamente, chegando a ser quase 4 vezes maior que o valor nominal, além de provocar um aquecimento e vibração intensos no motor. Neste teste, os valores de corrente foram obtidos após cerca de 10 segundos para não danificar o motor, uma vez que no último teste será mostrada a variação da corrente com o tempo nas piores condições.

Tabela 15 - Falta da fase B na partida em ligação triângulo.

VALORES DE CORRENTE PARA FALTA DE FASE NA PARTIDA (220 V)					
LIGAÇÃO TRIÂNGULO (MOTOR EM VAZIO)					
FALTA DA FASE B					
Tensão AB	Tensão AC	Tensão BC	Corrente fase A	Corrente fase B	Corrente fase C
107	219	110	4,01	0	4,01

Fonte: Própria autora, 2024.

3.2.1 Teste da variação da corrente em função da resistividade

Como foi visto nos testes anteriores, o caso mais grave de desbalanceamento é a ausência de uma das fases no motor, sendo ainda pior na partida com a conexão em triângulo, provocando um aquecimento intenso no motor. Sendo assim, o objetivo do terceiro teste foi avaliar na pior situação a variação da corrente com o tempo em função da resistividade, que

está relacionado com o efeito da temperatura, tanto na partida quanto em regime de operação. Para todas as situações foi cronometrado um tempo de 60 segundos.

A resistividade elétrica é uma propriedade dos materiais que determina a oposição oferecida por um material à passagem da corrente elétrica através de um condutor. A resistividade elétrica de um material condutor é diretamente proporcional à temperatura deste condutor. Logo, quanto maior for a temperatura dos condutores do motor, maior será a resistividade e, conseqüentemente, a resistência elétrica, limitando a passagem de corrente elétrica.

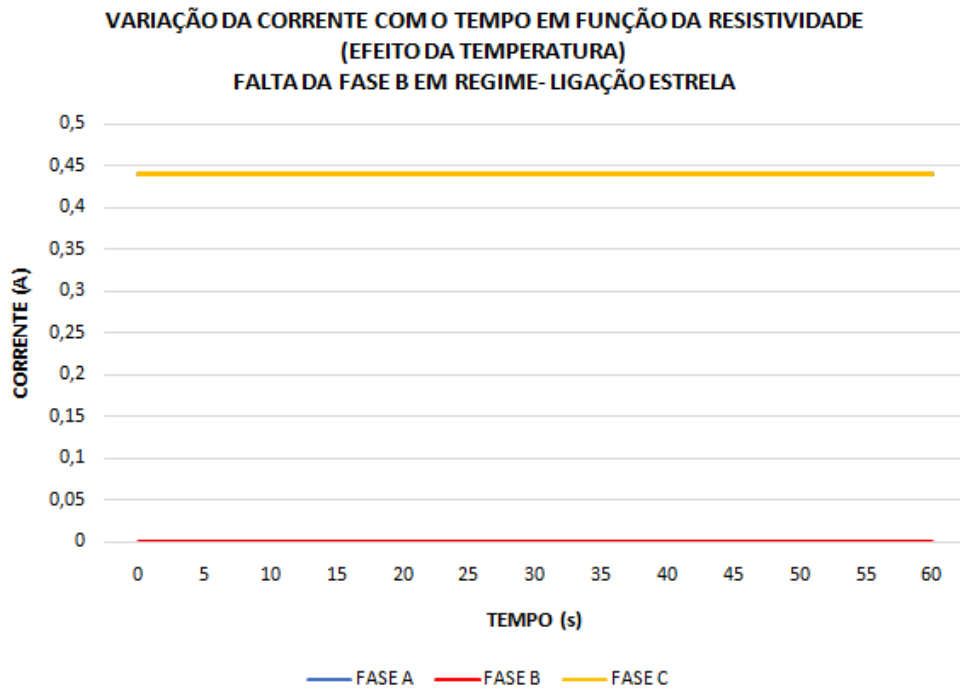
A Tabela 16 apresenta a variação da corrente ao longo do tempo em relação à resistividade durante uma falta de fase em regime de operação na configuração estrela. Neste caso, observou-se que durante todo o tempo, as correntes das fases A e C permaneceram constantes. Isso indica que, como o motor praticamente não se aqueceu, a resistividade dos condutores do motor não foi alterada. Isso se dá pelo fato de o motor estar recebendo a sua auto ventilação. A Figura 29 comprova o ocorrido, uma vez que é possível ver apenas a marcação da fase C, indicando que realmente ambas as fases mantiveram o mesmo valor durante os 60 segundos do teste.

Tabela 16 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão estrela em regime).

VARIAÇÃO DA CORRENTE COM O TEMPO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE (EFEITO DA TEMPERATURA)			
FALTA DA FASE B EM REGIME			
LIGAÇÃO ESTRELA			
TEMPO (S)	I FASE A	I FASE B	I FASE C
0	0,44	0	0,44
5	0,44	0	0,44
10	0,44	0	0,44
15	0,44	0	0,44
20	0,44	0	0,44
25	0,44	0	0,44
30	0,44	0	0,44
35	0,44	0	0,44
40	0,44	0	0,44
45	0,44	0	0,44
50	0,44	0	0,44
55	0,44	0	0,44
60	0,44	0	0,44

Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 29 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão estrela em regime).



A Tabela 17 apresenta a variação da corrente ao longo do tempo em relação à resistividade durante uma falta de fase em regime de operação na configuração triângulo. Neste caso, observou-se que a corrente da fase A foi um pouco superior à da fase C. No entanto, praticamente não houve redução da corrente ao longo do tempo de teste. Isso indica que, como o motor esquentou pouco, a resistividade dos condutores do motor não foi consideravelmente alterada. A Figura 30 comprova o ocorrido, uma vez que é possível ver a marcação da fase A e C, indicando que embora a corrente de uma fase é levemente superior à outra, as fases mantiveram o mesmo valor durante os 60 segundos.

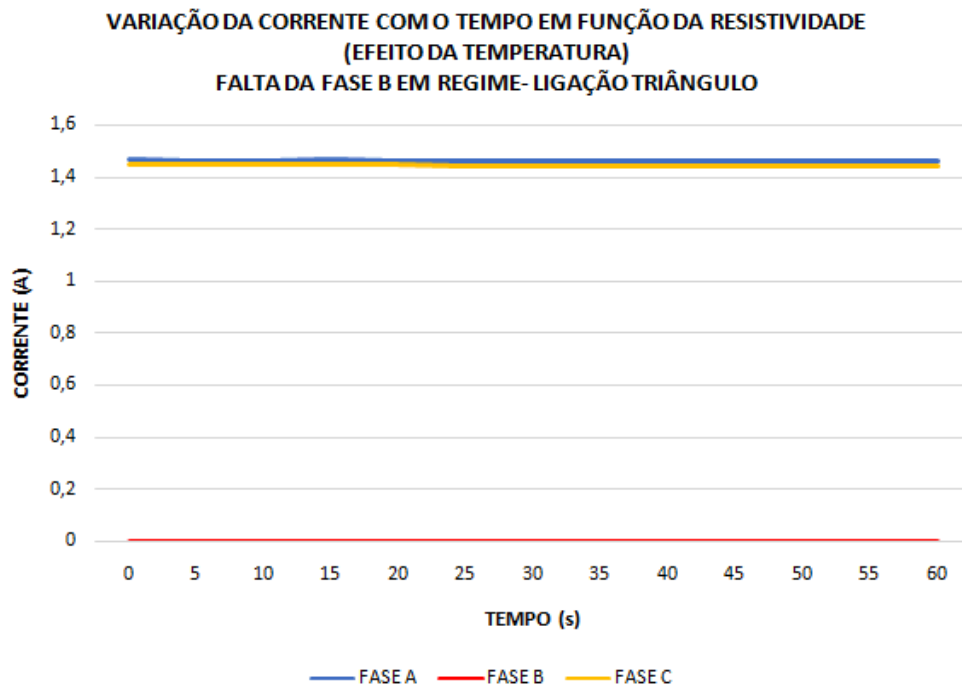
Tabela 17 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão triângulo em regime).

VARIAÇÃO DA CORRENTE COM O TEMPO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE (EFEITO DA TEMPERATURA)			
FALTA DA FASE B EM REGIME			
LIGAÇÃO TRIÂNGULO			
TEMPO (S)	I FASE A	I FASE B	I FASE C
0	1,47	0	1,45
5	1,46	0	1,45
10	1,46	0	1,45
15	1,47	0	1,45
20	1,46	0	1,45
25	1,46	0	1,44

30	1,46	0	1,44
35	1,46	0	1,44
40	1,46	0	1,44
45	1,46	0	1,44
50	1,46	0	1,44
55	1,46	0	1,44
60	1,46	0	1,44

Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 30 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão triângulo em regime).



Fonte: Própria autora, 2024.

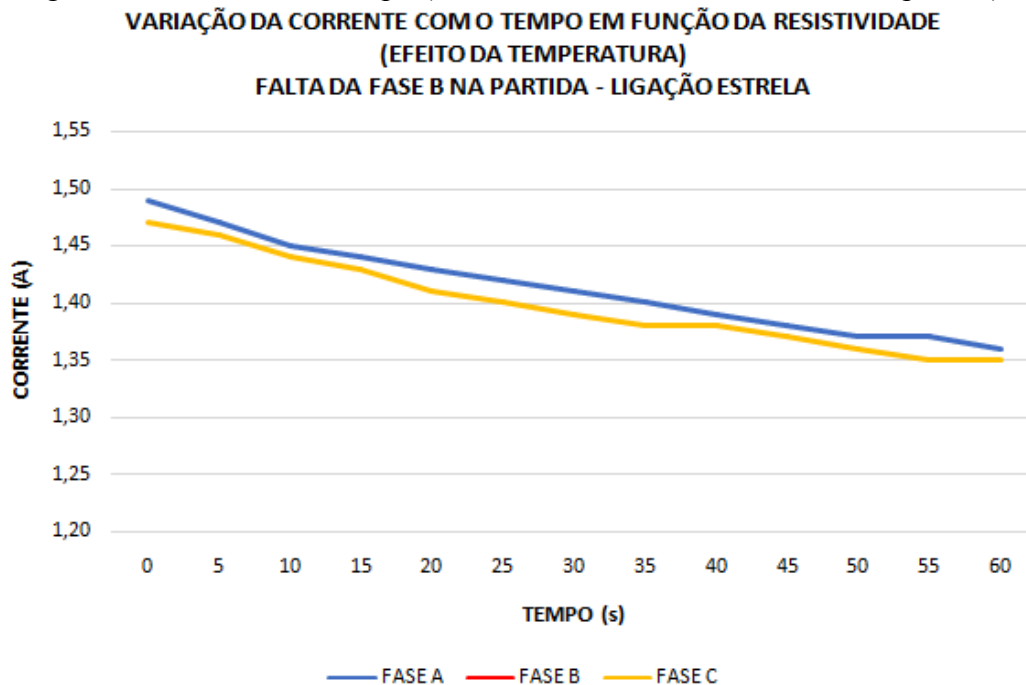
A Tabela 18 apresenta a variação da corrente ao longo do tempo em relação à resistividade durante uma falta de fase na partida em configuração estrela. Neste caso, observou-se que a corrente da fase A foi um pouco superior à da fase C. Além disso, houve uma redução da corrente de aproximadamente 0,01 A a cada 5 segundos até o final do teste. Isso indica que, como o motor esquentou de forma mais sensível, a resistividade dos condutores do motor aumentou, elevando também a resistência elétrica das bobinas e, consequentemente, provocando esta redução nos valores de corrente elétrica. A Figura 31 ilustra o que foi descrito.

Tabela 18 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão estrela na partida).

VARIAÇÃO DA CORRENTE COM O TEMPO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE (EFEITO DA TEMPERATURA)			
FALTA DA FASE B NA PARTIDA			
LIGAÇÃO ESTRELA			
TEMPO (S)	I FASE A	I FASE B	I FASE C
0	1,49	0	1,47
5	1,47	0	1,46
10	1,45	0	1,44
15	1,44	0	1,43
20	1,43	0	1,41
25	1,42	0	1,4
30	1,41	0	1,39
35	1,4	0	1,38
40	1,39	0	1,38
45	1,38	0	1,37
50	1,37	0	1,36
55	1,37	0	1,35
60	1,36	0	1,35

Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 31 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão estrela na partida).



Fonte: Própria autora, 2024.

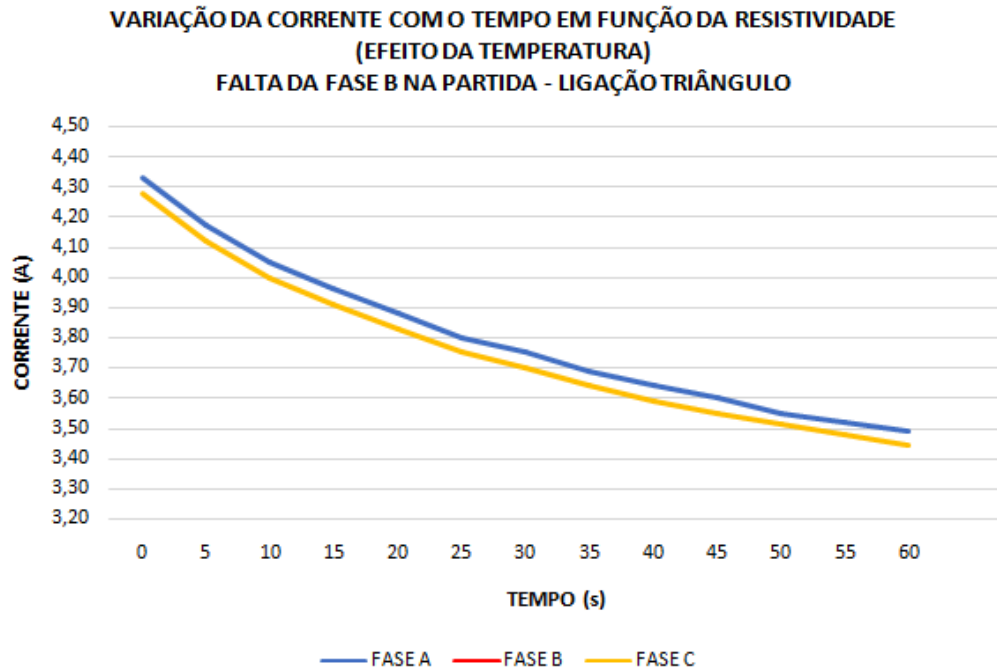
Por fim, a Tabela 19 apresenta a variação da corrente ao longo do tempo em relação à resistividade durante uma falta de fase na partida em configuração triângulo. Neste caso, observou-se que a corrente da fase A foi superior à da fase C. Além disso, a corrente começou a diminuir de forma acentuada. Isso indica que, como o motor esquentou de forma considerável, a resistividade dos condutores do motor aumentou drasticamente, elevando também a resistência elétrica e provocando esta rápida queda no valor da corrente elétrica. Nesta situação, o motor apresentou risco de danos permanentes, que pode ser percebido através do odor característico do material isolante super aquecido. A Figura 32 ilustra o que foi descrito.

Tabela 19 - Valores de corrente vs tempo (falta de fase com conexão triângulo na partida).

VARIAÇÃO DA CORRENTE COM O TEMPO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE (EFEITO DA TEMPERATURA)			
FALTA DA FASE B NA PARTIDA			
LIGAÇÃO TRIÂNGULO			
TEMPO (S)	I FASE A	I FASE B	I FASE C
0	4,33	0	4,28
5	4,17	0	4,12
10	4,05	0	4
15	3,96	0	3,91
20	3,88	0	3,83
25	3,8	0	3,75
30	3,75	0	3,7
35	3,69	0	3,64
40	3,64	0	3,59
45	3,6	0	3,55
50	3,55	0	3,51
55	3,52	0	3,48
60	3,49	0	3,44

Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 32 - Corrente vs Tempo (falta de fase com conexão triângulo na partida).



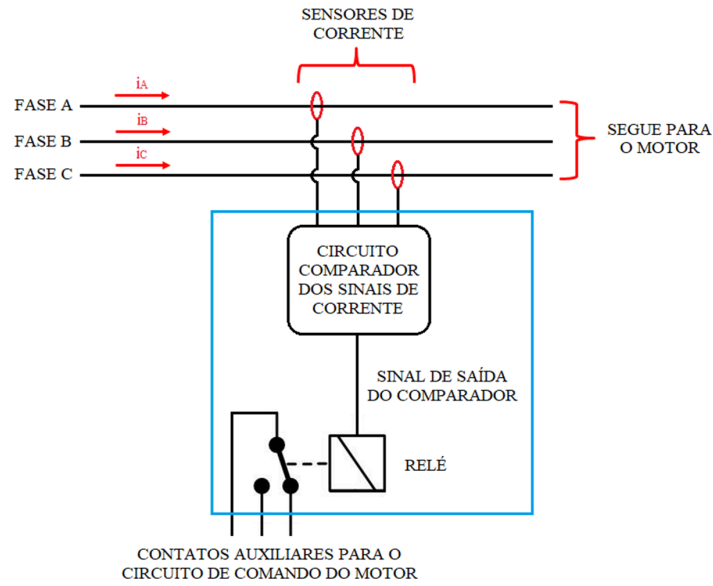
3.2 Dispositivo proposto

Para a criação do novo dispositivo de proteção, foram considerados os seguintes pontos principais:

- Um princípio de funcionamento baseado na variável corrente elétrica, permitindo a verificação de desequilíbrios de corrente em qualquer ponto do circuito, independente do local de instalação do dispositivo;
- Capacidade de analisar as possíveis causas desses desequilíbrios, como desbalanceamento de tensão e falta de fase, impedindo o funcionamento do motor de indução trifásico na ocorrência destas falhas.

Assim, baseado nos pontos principais destacados, a ideia inicial foi utilizar um sensor de corrente para analisar cada fase e criar um circuito que comparasse os valores de corrente entre as fases. A partir desta comparação, um sinal seria liberado para a saída de um relé, que, ao atuar, comutaria seus contatos auxiliares no circuito de comando, desenergizando o motor. A Figura 33 mostra como seria essa configuração.

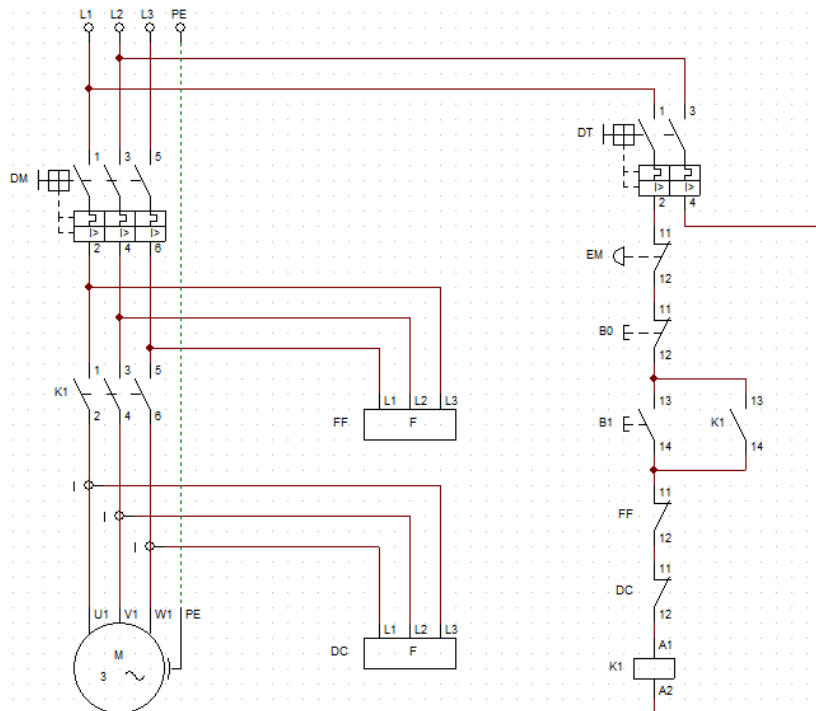
Figura 33 - Configuração inicial do dispositivo proposto.



Fonte: Própria autora, 2024.

Diferentemente do relé de falta de fase (FF), o dispositivo proposto, o qual foi denominado relé de desbalanceamento de corrente (DC), pode ser instalado após o contator no circuito de força, sem comprometer seu funcionamento. Já no circuito de comando, o contato do relé DC mantém-se da mesma forma que o contato do relé FF. A Figura 34, exibe a disposição dos relés no circuito de força e de comando.

Figura 34 - Circuito de força e comando.

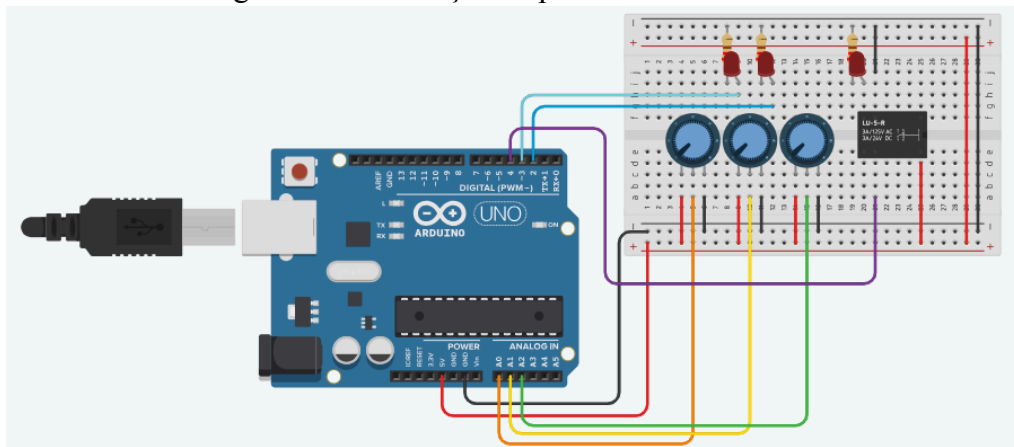


Fonte: Própria autora, 2024.

3.3 Princípio de funcionamento

Inicialmente, foi utilizada a plataforma *Tinkercad* para simular a lógica do desbalanceamento de tensão e da falta de fase em corrente contínua. Na simulação, foram utilizados um potenciômetro para cada fase do circuito para simular o desbalanceamento de tensão e a falta de fase, um relé para representar a desenergização do motor, um Arduino UNO para implementar a lógica de programação e *LEDs* para a sinalização. A Figura 35 apresenta o circuito simulado na plataforma *Tinkercad*.

Figura 35 - Simulação na plataforma *Tinkercad*.

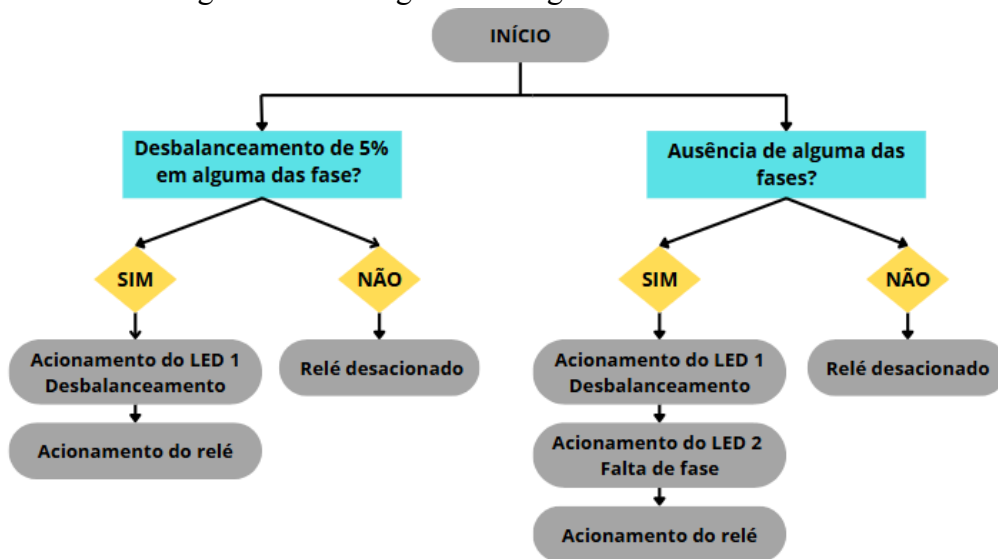


Fonte: Própria autora, 2024.

A Figura 36 mostra o fluxograma da lógica do circuito implementado no *Tinkercad*. Quando o potenciômetro da fase 1 é ajustado para que haja um desequilíbrio superior a 5% do valor de tensão da fase 2 ou da fase 3, o *LED 1* é acionado, sinalizando que existe um desbalanceamento de tensão entre as fases. Desse modo, o relé é acionado indicando que o motor foi desenergizado. A mesma lógica é aplicada para as fases 2 e 3.

Quando o potenciômetro de uma das fases é ajustado para sua resistência máxima, ou seja, quando a tensão é próxima de zero, o *LED 2* é acionado, sinalizando a falta de fase e o *LED 1* também é acionado, uma vez que a ausência de uma fase é o nível mais grave de desbalanceamento. Dessa forma, o relé é acionado indicando que o motor foi desenergizado. Nesta lógica, considera-se falta de fase quando os valores de tensão são menores ou iguais a 0,1V. Valores superiores a essa medida indicam desbalanceamento de tensão.

Figura 36 - Fluxograma da lógica do circuito inicial.



Fonte: Própria autora, 2024.

Após compreender a lógica do dispositivo, o segundo passo foi implementar os sensores de corrente e adaptar tanto o circuito quanto o código para integrar esses componentes. Nesse sentido, optou-se pelo sensor não invasivo de corrente alternada HWCT, para evitar a necessidade de abrir o circuito e conectá-lo em série com a carga. O sensor escolhido possui uma relação de corrente de entrada e saída de 5 A/5 mA, o que foi suficiente, já que nos testes realizados a pior situação não ultrapassou 5 A. A Figura 37 exibe o sensor de corrente utilizado.

Figura 37 - Sensor de corrente HWCT.

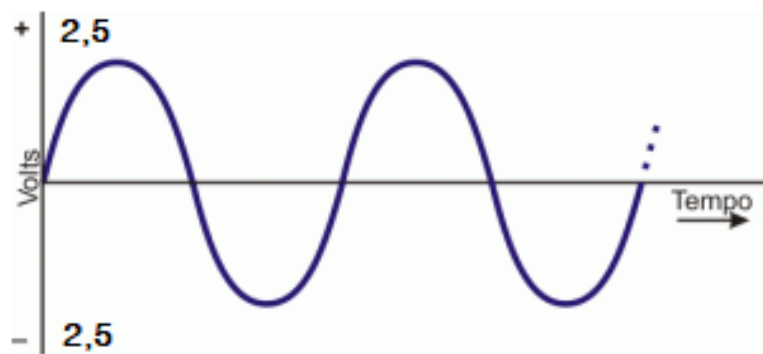


Fonte: TIGGERCOMP, 2024.

Para a implementação do código, foi utilizado o *Arduino NANO Mini*, que, devido ao seu tamanho reduzido, permite um circuito mais compacto. Uma vez que este *Arduino* não é capaz de interpretar sinais de corrente, e sim, sinais de tensão entre 0 V e 5 V em seus pinos de entrada analógica, foi necessário converter o sinal de corrente alternada do HWCT para um valor de tensão que possa ser interpretado pelo *Arduino*.

Para isso, é necessário dimensionar um resistor de carga entre os terminais dos sensores de corrente. Considerando que a corrente alterna em torno de zero, esse resistor será calculado de forma a garantir que a tensão sobre ele seja de 2,5 V. A Figura 38 mostra a tensão variando de -2,5 a +2,5 em torno do zero.

Figura 38 - Forma de onda da tensão no resistor de carga.



Fonte: Adaptado de DEMETRAS, 2017.

O sensor é ajustado para medir uma corrente alternada máxima de 5 A AC. Este valor representa a corrente *RMS*. Logo, conforme a Equação (7) a corrente de pico medida é:

$$i(\text{medido}) = \sqrt{2} \times i(\text{RMS}) = \sqrt{2} \times 5 = 7,07\text{A} \quad (7)$$

Como a relação de corrente de entrada e saída é 5 A/5 mA, o número de espiras no secundário será obtido conforme a Equação (8):

$$\frac{N1}{N2} = \frac{I2}{I1} \rightarrow \frac{1}{N2} = \frac{5\text{mA}}{5\text{A}} \rightarrow N2 = 1000 \text{ espiras} \quad (8)$$

A corrente na saída do sensor é inversamente proporcional ao número de voltas, logo de acordo com a Equação (9) a corrente será:

$$i(\text{sensor}) = \frac{i(\text{medido})}{n^{\circ} \text{ de espiras}} = \frac{7,07}{1000} = 7,07 \text{ mA} \quad (9)$$

Com a corrente do sensor será possível calcular o resistor de carga para a tensão de 2,5 V como mostra a Equação (10):

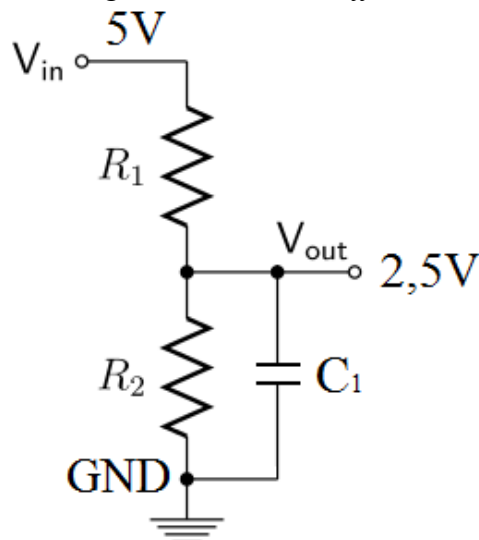
$$R(\text{carga}) = \frac{V(\text{sensor})}{I(\text{sensor})} = \frac{2,5}{7,07 \text{ mA}} = 353,61 \Omega \quad (10)$$

$$R(\text{comercial}) = 330 \Omega$$

Agora têm-se um sinal de tensão alternada variando entre +2,5 V e -2,5 V. Como o *Arduino* não consegue interpretar valores de tensão negativos, é necessário adicionar um valor de 2,5 V ao sinal para que ele varie entre 0 V e 5 V, ficando apenas com valores proporcionais positivos.

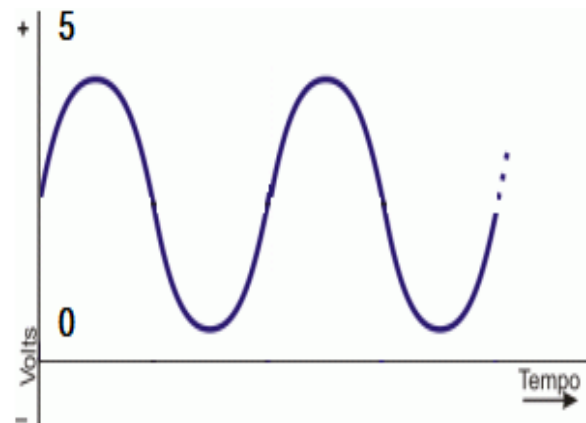
Dessa forma, é preciso construir um divisor de tensão usando a alimentação de 5 V fornecida pela placa *Arduino*. Logo, considerando R_1 e R_2 , cada um com 10 K Ω , a tensão será dividida igualmente entre eles, resultando em 2,5 V sobre cada resistor. Para adicionar 2,5 V à fonte AC, é necessário incluir um capacitor no meio do divisor de tensão, esse valor acrescentado é chamado de *offset* e funciona como se fosse uma bateria, transformando a tensão alternada em contínua a partir do deslocamento do eixo do sinal. Nesse caso, foi adicionado um capacitor de 10 μF . A Figura 39 e a Figura 40 exibem a configuração e a forma de onda do circuito *offset*, respectivamente.

Figura 39 - Circuito *offset*.



Fonte: DEMETRAS, 2017.

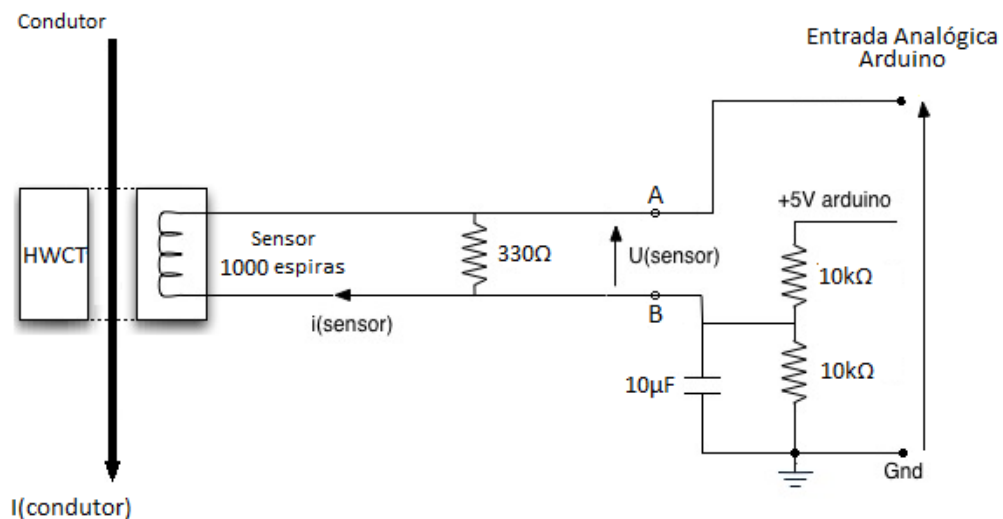
Figura 40 - Forma de onda com *offset*.



Fonte: Adaptado de DEMETRAS, 2017.

Dessa forma, com todos os componentes devidamente dimensionados, o circuito final para cada fase ficou conforme mostrado na Figura 41.

Figura 41 - Circuito final.



Fonte: Adaptado de DEMETRAS, 2017.

Na atualização do código, foi adicionada uma variável de calibração denominada *CURRENT CAL*, conforme mostra a Figura 42. Esta variável serve para ajustar o valor de corrente AC medida pelo multímetro com o valor apresentando no monitor serial, permitindo que o sensor seja calibrado corretamente e efetue medições com precisão. Para estimar o valor de calibração, basta dividir o número de espiras no secundário pelo resistor de carga dimensionado, conforme a Equação (11), no entanto, é necessário ir ajustando este valor até que o valor exibido no multímetro seja o mesmo do monitor serial.

Figura 42 - Variável de calibração.

```

3 #define CURRENT_CAL_1 2.744 //VALOR DA CALIBRAÇÃO
4 #define CURRENT_CAL_2 2.744 //VALOR DA CALIBRAÇÃO
5 #define CURRENT_CAL_3 2.744 //VALOR DA CALIBRAÇÃO

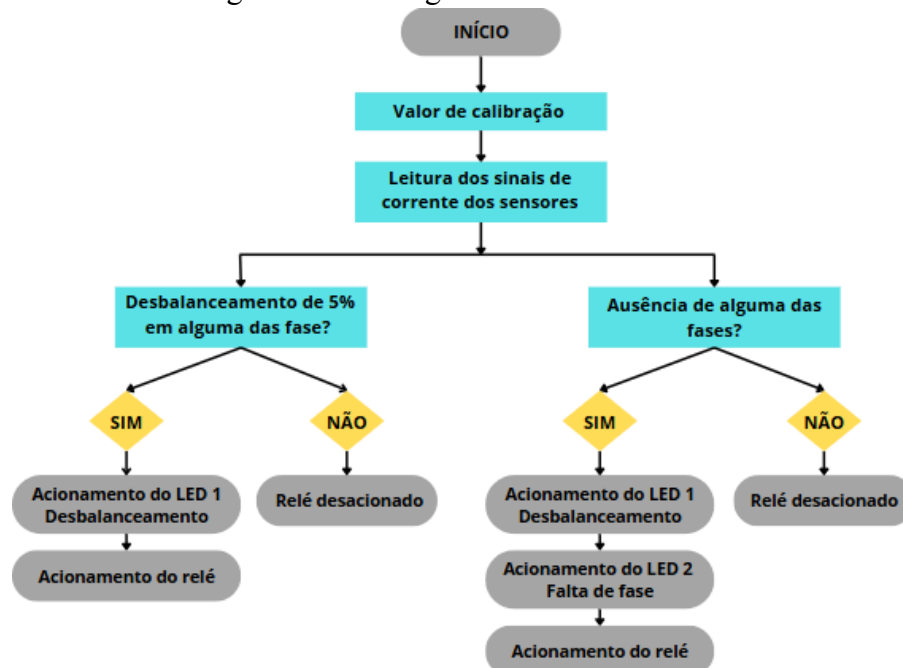
```

Fonte: Própria autora, 2024.

$$\frac{N2}{R(carga)} = \frac{1000}{330} = 3,03 \quad (11)$$

Mantendo a lógica inicial e incorporando as adaptações feitas no código e no circuito, foi possível fazê-lo funcionar com base na corrente elétrica medida pelos sensores, convertendo os valores de corrente em valores de tensão compatíveis com o *Arduino* escolhido. A Figura 43 apresenta o fluxograma atualizado.

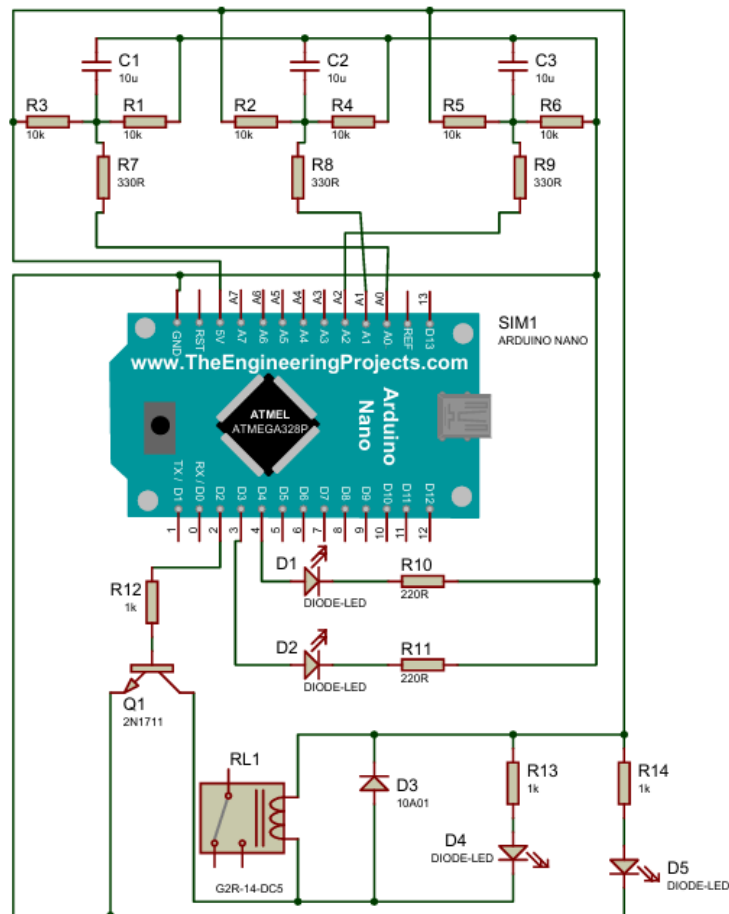
Figura 43 - Fluxograma do circuito final.



Fonte: Própria autora, 2024.

A Figura 44 ilustra o circuito aprimorado com a inclusão dos sensores de corrente no *software* Proteus. As entradas A0, A1 e A2 do *Arduino*, representam cada fase do circuito. Em cada entrada estão conectados um resistor de carga, um divisor de tensão e um capacitor de offset de 10 μF . Nas saídas digitais 3 e 4 estão conectados os *LEDs* de sinalização, que indicam se o motor apresenta desbalanceamento de tensão e falta de fase. E na saída 2 estão conectados os componentes que constituem o módulo do relé, responsável por desenergizar o MIT.

Figura 44 - Circuito com a adição dos sensores de corrente no *software* Proteus.



Fonte: Própria autora, 2024.

3.4 Desenvolvimento do dispositivo

Como mencionado anteriormente, o primeiro passo envolveu a montagem do circuito em corrente contínua para verificar a lógica do dispositivo utilizando o *Arduino UNO*. A Figura 45 apresenta a configuração do circuito conforme simulada na plataforma *Tinkercad*.

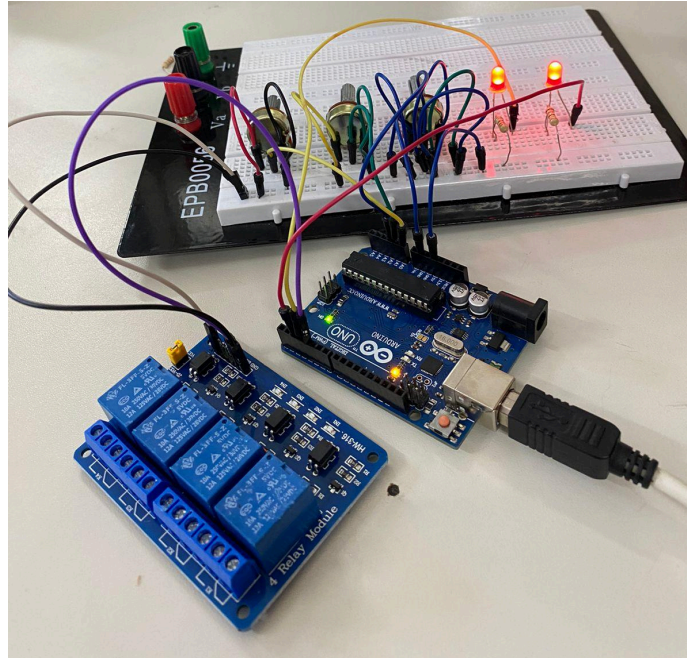
Para simular desbalanceamentos de tensão e falta de fase, foram utilizados potenciômetros. Os terminais centrais dos potenciômetros foram conectados às entradas analógicas A0, A1 e A2, enquanto os terminais das extremidades foram conectados a 5 V e GND.

Os *LEDs* servem para indicar falhas no motor. O ânodo de cada *LED* foi conectado à saída digital, enquanto o cátodo foi conectado a um resistor de baixa resistência para limitar a corrente antes de ser ligado ao GND. As saídas 3 e 2 foram usadas para essa sinalização.

O relé, que desenergiza o motor em caso de falha, foi alimentado com GND e 5 V e conectado à saída digital 4 do *Arduino*. Na simulação, um *LED* foi incluído para monitorar o funcionamento do relé. Contudo, o módulo do relé já possui um *LED* de status incorporado,

não sendo necessária a adição de outro. Os cabos que saem do relé foram ligados à linha de comando do circuito para interromper o funcionamento do MIT no momento correto.

Figura 45 - Montagem do circuito implementado na plataforma *Tinkercad*.



Fonte: Própria autora, 2024.

O segundo passo consistiu na montagem do circuito em corrente alternada, visando testar o funcionamento do dispositivo em sua real função, que é a proteção do MIT. Para isso, alguns componentes do circuito inicial foram substituídos. A Figura 46 mostra a configuração do circuito final cujo o esquemático foi previamente apresentado na Figura 44.

A fim de obter um circuito mais compacto e eficiente, o *Arduino* UNO foi substituído pelo *Arduino* NANO. Essa modificação não alterou em nada a lógica do circuito, apenas otimizou o espaço.

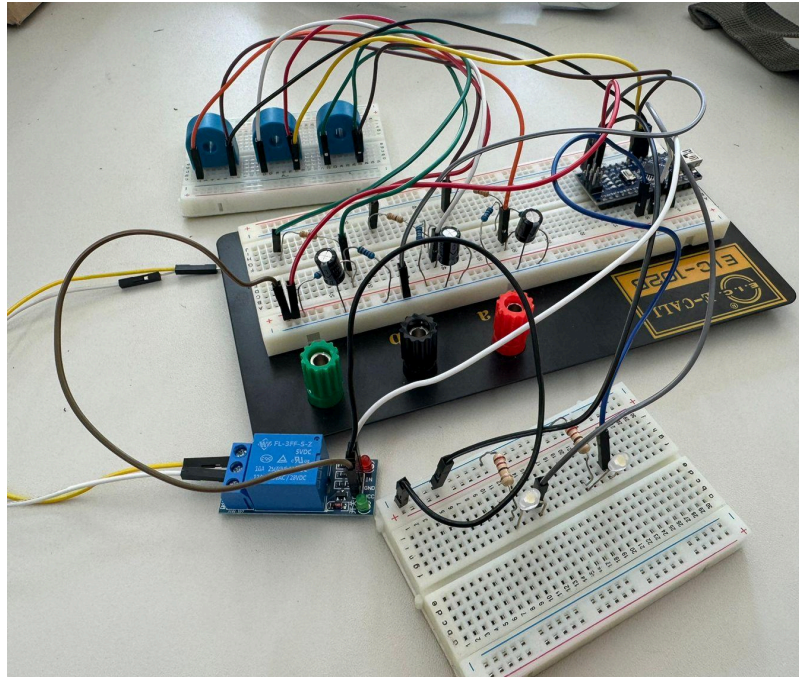
No circuito anterior, foram utilizados potenciômetros para simular desbalanceamentos de tensão e falta de fase. Contudo, na nova configuração, os potenciômetros foram substituídos por sensores de corrente. Esses sensores são conectados em paralelo com o resistor de carga, com um terminal ligado à entrada analógica do *Arduino* e o outro ao centro do divisor de tensão.

Devido à presença dos sensores de corrente, cada fase requer um circuito *offset*. Este circuito é composto por um divisor de tensão e um capacitor. O divisor de tensão é constituído por dois resistores de mesmo valor, com um terminal comum ligado a um terminal do resistor

de carga, e suas extremidades conectadas, uma ao GND e outra aos 5 V. O capacitor, por sua vez, tem um terminal conectado ao centro do divisor de tensão e o outro ao GND.

Os *LEDs* de sinalização com os seus respectivos resistores e o módulo relé não sofreram nenhuma mudança. Logo, exercem a mesma função do circuito inicial.

Figura 46 - Montagem do circuito final implementado no *software* Proteus.



Fonte: Própria autora, 2024.

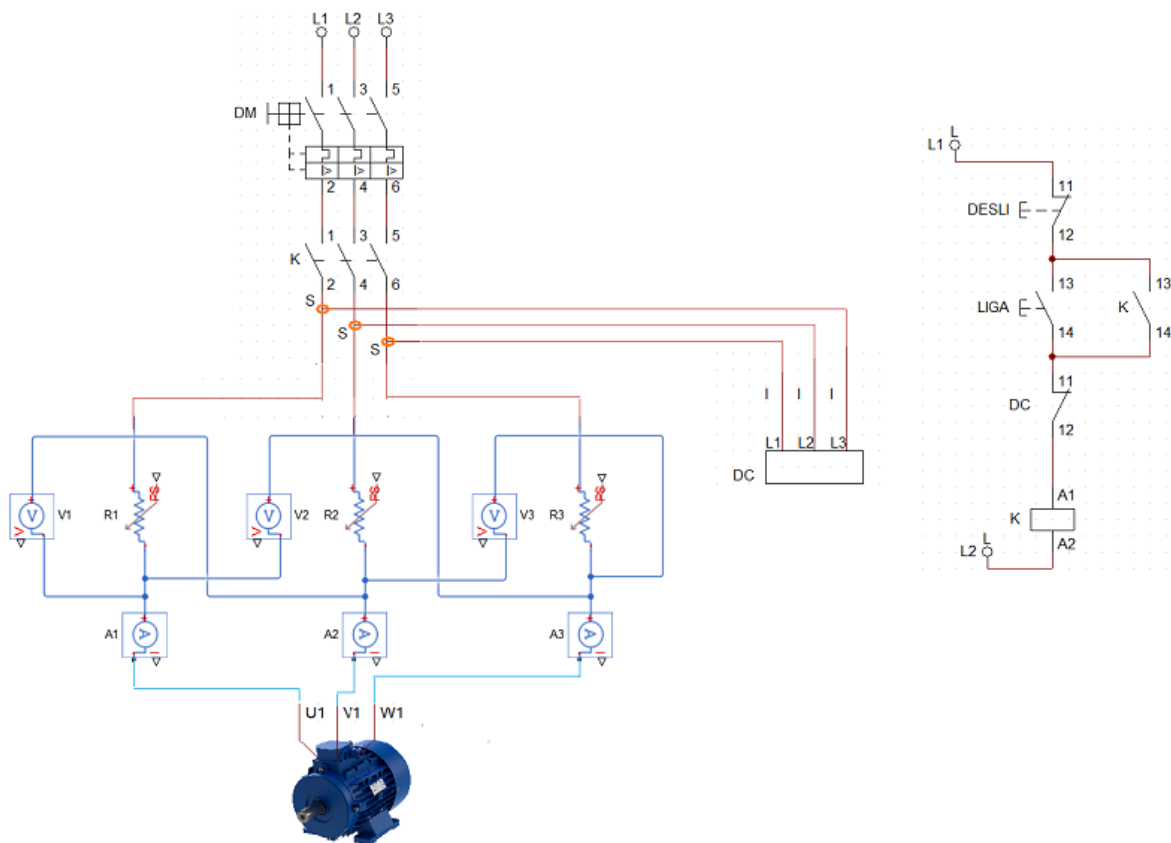
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico, serão abordados os resultados do dispositivo desenvolvido, realizando novamente os testes com o dispositivo em conjunto com o motor. Além disso, será analisado um possível custo para este dispositivo em comparação com os dispositivos atualmente disponíveis no mercado.

4.1 Instalação do dispositivo junto ao motor

Visando comprovar a eficácia do dispositivo desenvolvido, o terceiro passo consistiu em repetir os testes, desta vez com o dispositivo acoplado ao motor. Para isso, foi realizada a montagem dos circuitos de força e de comando, conforme o esquema de ligação apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Esquemático de ligação dos circuitos de força e de comando.



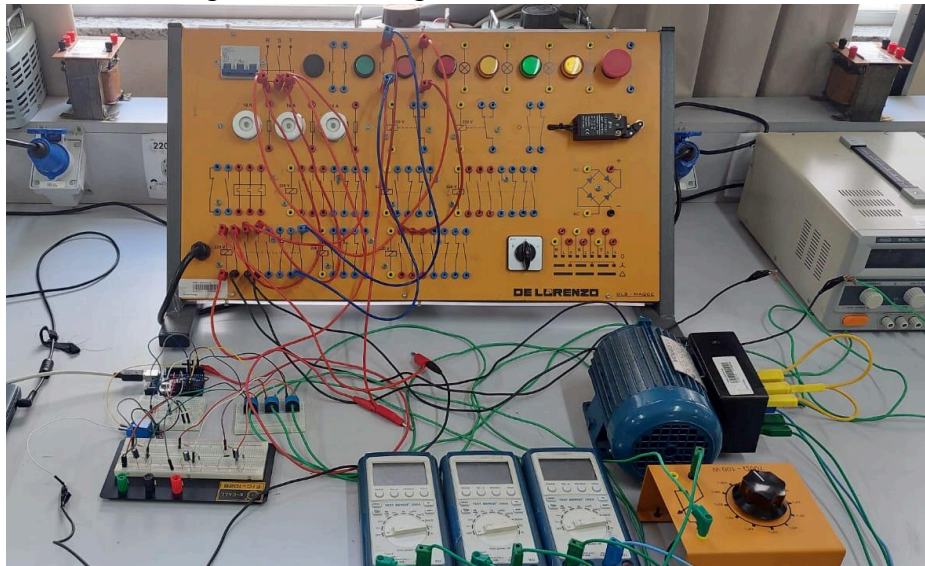
Fonte: Própria autora, 2024.

No circuito de força, para simular e controlar o desbalanceamento de tensão e a falta de fase, um reostato foi inserido em série com a rede em cada fase. Após isso, foi adicionado um contator e, antes das fases chegarem ao motor, estas passaram por um amperímetro para monitorar o valor da corrente na linha de alimentação.

No circuito de comando, foi feito um *jumper* de uma fase para as botoeiras de desliga e liga, em série, com contato normalmente fechado e normalmente aberto, respectivamente. Após isso, a partir do terminal de saída da botoeira de liga, foi inserido o relé e, em seguida, a bobina do contator, que se encerra em outra fase distinta.

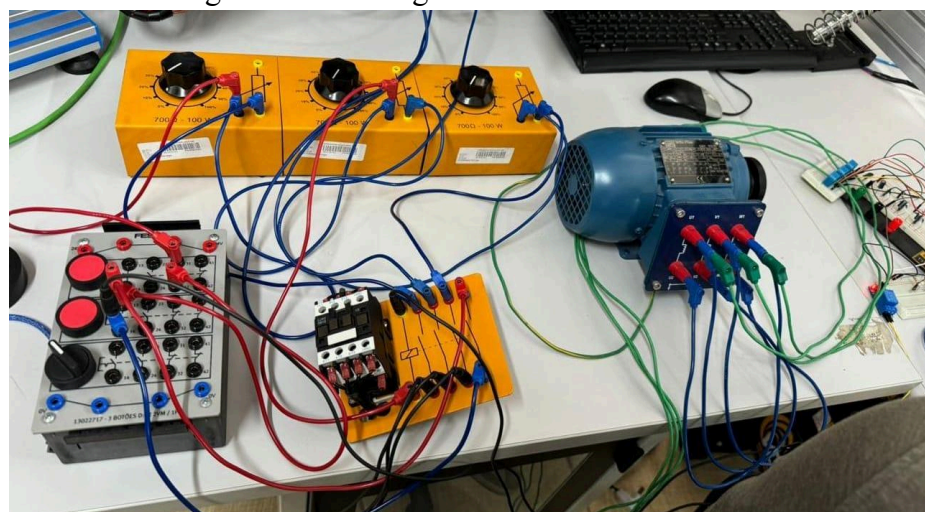
As Figuras 48 e 49 mostram a montagem física do esquemático de ligação em dois dias distintos.

Figura 48 - Montagem do circuito final dia 1.



Fonte: Própria autora, 2024.

Figura 49 - Montagem do circuito final dia 2.



Fonte: Própria autora, 2024.

Portanto, com a instalação do dispositivo junto ao motor e refazendo os testes de desbalanceamento e falta de fase, foi possível comprovar a eficácia do dispositivo desenvolvido, uma vez que com a ocorrência destas falhas o motor foi imediatamente desligado suprindo as expectativas (EVELYN, 2025). Devido a sua característica de funcionamento, ele permitiu a detecção das falhas do sistema em qualquer ponto da linha de alimentação do motor.

Um dos pontos mais relevantes do funcionamento do dispositivo desenvolvido é o tempo de resposta à falha. Tanto na ocorrência do desbalanceamento de tensão quanto na falta de fase, o dispositivo atuou de forma instantânea, garantindo que o motor não fosse exposto a nenhum instante de condição indesejada.

Os testes foram repetidos diversas vezes para as duas condições de falha, nas três fases, tanto na partida quanto em regime, e apresentaram a mesma resposta em relação ao funcionamento esperado.

4.2 Levantamento do custo de mercado do dispositivo desenvolvido

Como visto anteriormente, o dispositivo desenvolvido mostrou-se mais eficaz do que os dispositivos existentes no mercado, pois analisa tanto a variável corrente quanto a variável tensão. No entanto, por ser mais completo e integrar várias funções de monitoramento e proteção, será analisado qual seria o custo desse dispositivo em comparação com os dispositivos atualmente disponíveis no mercado.

Definir o valor de mercado ideal para um dispositivo que propõe ser diferenciado dos demais exige muito mais do que simplesmente definir uma margem de lucro ao custo estimado do produto. Um entendimento mais elaborado de todos os custos envolvidos na produção, desde as matérias-primas e componentes até a disponibilização ao cliente final, é indispensável para que não surja o risco de uma precificação insuficiente, que comprometa a lucratividade e, em casos extremos, retorne prejuízos.

Dessa forma, primeiramente, foi realizada uma avaliação dos componentes necessários para a construção do dispositivo, bem como uma análise dos valores médios desses componentes no mercado. A Tabela 20 exhibe esses dados de forma detalhada.

Tabela 20 - Valores dos componentes utilizados para o desenvolvimento do dispositivo.

Componente	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Sensor de Corrente AC HWCT 5A	3	15	45
Arduino Nano Mini	1	35	35
Capacitor 10uF	3	0,5	1,5
Resistor 10kΩ	6	0,1	0,6
Resistor 330Ω	3	0,1	0,3
Resistor 220Ω	2	0,1	0,2
LED Branco	2	1	2
Módulo Relé	1	15	15
Protoboard	1	20	20
Pacote de cabos	1	15	15
Total			134,6

Fonte: Própria autora, 2024.

Este valor corresponde ao custo do desenvolvimento de uma unidade do protótipo, desconsiderando o custo de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento).

Em seguida, foi feita uma pesquisa do preço médio de alguns dispositivos que analisam a variável tensão, como o relé de falta de fase e o relé de subtensão e sobretensão, e que analisam a variável corrente, como o relé de sobrecorrente e o relé de sobrecarga, que desempenham cada função individualmente. A Tabela 21 mostra os preços dos dispositivos existentes no mercado.

Tabela 21 - Valores dos dispositivos existentes no mercado.

Tipo de Relé	Valor Médio de Mercado (R\$)
Relé de Falta de Fase	130
Relé de Sobretensão e Subtensão	255
Relé de Sobrecorrente	130
Relé de Sobrecarga	130
Custo Total ao Usuário	645

Fonte: Própria autora, 2024.

Observa-se que o custo total ao usuário que necessita dispor de todos os dispositivos descritos é de R\$645,00. Logo, para o levantamento do valor final do dispositivo desenvolvido, a nível comercial, deve-se levar em consideração:

- O custo para o desenvolvimento de um invólucro adequado para abrigar o circuito eletrônico interno;
- Os custos operacionais de produção em larga escala;

- O fato de o dispositivo ser uma junção das funções de vários dispositivos existentes;
- A aplicabilidade, facilidade de uso e a facilidade de adição de novas funções sem a necessidade de alterações no hardware.

A partir da análise destes pontos e considerando os custos apresentados nas tabelas 20 e 21, conclui-se que um valor final de mercado para o dispositivo não poderá ser definido sem um estudo de mercado mais aprofundado, identificando todos os custos diretos, indiretos e uma estimativa de unidades produzidas mensalmente. Somente dessa maneira seria possível encontrar um valor unitário ideal e este estudo não compreende o foco deste Trabalho de Conclusão de Curso.

5. CONCLUSÃO

O motor de indução trifásico é essencial para a operação industrial devido à sua robustez e confiabilidade. Para assegurar o desempenho ideal e a longevidade do motor, é indispensável implementar uma proteção eficiente.

Problemas como desbalanceamento de tensão e falta de fase podem causar desequilíbrio de corrente e um aumento significativo da temperatura no motor, levando à degradação dos enrolamentos, redução da eficiência e, em casos extremos, à queima do motor.

Os dispositivos de proteção existentes no mercado apresentam algumas limitações quando utilizados em motores, o que pode comprometer a proteção desejada. Entre essas limitações, destacam-se a não identificação da falha após o ponto de instalação e a análise de apenas uma variável elétrica, resultando em uma proteção incompleta.

Os testes realizados confirmaram que o pior cenário ocorre quando o motor opera com falta de fase na partida com conexão em triângulo, resultando em aumento acentuado da corrente, vibrações e aquecimento excessivo, apresentando risco de danos permanentes, perceptíveis pelo odor característico do material isolante superaquecido.

Com base nos dispositivos já existentes e nos testes realizados, o dispositivo de proteção desenvolvido, que se baseia na análise da corrente do motor, demonstrou alta eficácia. Sua característica de funcionamento permitiu a detecção de falhas em qualquer ponto da linha de alimentação do motor, impedindo seu funcionamento em todas as situações, inclusive no pior cenário, que é a falta de fase na partida em conexão triângulo. Além disso, o dispositivo se mostrou completo, pois analisa tanto a corrente quanto a tensão, identificando a origem dos desbalanceamentos, que podem ser causados por desequilíbrios de tensão ou falta de fase.

Este Trabalho de Conclusão de Curso validou a funcionalidade do dispositivo de proteção desenvolvido, confirmando sua capacidade de proteger o motor de indução trifásico e garantir a integridade e confiabilidade do sistema industrial.

6. TRABALHOS FUTUROS

Um trabalho futuro a ser desenvolvido e que impactará ainda mais nas melhorias do dispositivo é a adição de *Trim pots* de regulação da sensibilidade do desbalanceamento de tensão e do tempo para atuação após a identificação da falha, evitando desligamentos por falhas de curta duração, deixando o dispositivo de proteção ainda mais eficiente e ajustável de acordo com as necessidades específicas.

Além disso, é possível incorporar uma proteção contra sobrecarga utilizando apenas melhorias no código do dispositivo, sem a necessidade de adicionar novos componentes ao circuito. Com a otimização do código, o sistema poderia monitorar e responder eficientemente a situações de sobrecarga, aumentando a segurança e a confiabilidade do dispositivo.

Uma variável de status pode ser adicionada ao código para identificar facilmente cada condição do motor, aprimorando a sua estrutura. Além disso, a implementação de um display seria benéfica para monitorar e exibir em tempo real o estado do motor, facilitando a detecção de falhas e melhorando a usabilidade e a manutenção do sistema. Essas melhorias proporcionarão maior controle e transparência no funcionamento do dispositivo.

Durante o desenvolvimento deste dispositivo, foi utilizada uma protoboard para a montagem dos componentes eletrônicos. Para trabalhos futuros, é ideal a transição para uma placa de circuito impresso (PCB), tornando o dispositivo mais compacto, robusto e organizado. Além disso, é importante desenvolver um design de encapsulamento adequado para abrigar o circuito eletrônico, conferindo ao dispositivo um aspecto mais profissional e garantindo a proteção dos componentes contra danos físicos e interferências externas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Tadeu Lyrio de. **ECA 34 - Máquinas elétricas para automação: Motores elétricos**. Universidade Federal de Itajubá, 2004. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/slideshow/apostila-motores/67214411>> . Acesso em: 29 maio 2024.
- ALVES, Matheus Amaral. **Análise do desempenho de motores de indução trifásicos operando com tensões desequilibradas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34012/3/An%c3%a1liseDesempenhoMotores.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- ANEEL, 2020. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodist_modulo_8_v11.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- BENETELI, Tatianna Aparecida Pereira. **Método para limitação de índices de desequilíbrios de máquinas elétricas trifásicas em sistemas de distribuição**. 2015. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/260/1/tatiannaaparecidapereirabeneteli.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2024.
- BRITO, Jorge Nei. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/239996>>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- BULGARELLI, Roberval. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-01122006-134918/publico/RobervalBulgarelli.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2024.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- DEL TORO, Vincent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994.
- DEMETRAS, Ezequiel. **SCT-013 – Sensor de Corrente Alternada com Arduino**. Vida de Silício, 2017. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/>>. Acesso em: 24 dez. 2024.
- DIAS, Luiz Felipe. **Proteção de motores elétricos de grande porte**. 2013. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista

Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/7df3b397-459d-46fc-8e63-76029792dda8/content>>. Acesso em: 23 maio 2024.

EATON. **Medição fácil, monitoramento confiável e planejamento flexível: os relés EMR, ETR e EMT.** Porto Feliz, 2018. Disponível em: <<file:///C:/Users/stefa/Downloads/catalogo-emr-etr-emt-pt-br.pdf>>. Acesso em: 24 maio 2024.

ELETOBRAS. **Relatório de resultados do Procel 2021 (ano-base 2020).** Rio de Janeiro: PROCEL, 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2021/>. Acesso em: 18 maio 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2022 (ano-base 2021).** Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2024.

EVELYN, Stéfany. **Relé de desbalanceamento de corrente.** Youtube, 2025. Acesso: 05 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=8f8C6x84xR0>>.

FILHO FERREIRA, Anésio de Leles. **Análise do comportamento do fator de desequilíbrio frente a variações da amplitude e do ângulo da tensão.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/1335/1/2008_AnesioFerreiraFilho.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

FRANCISCO, A. M. S. **Motores de Indução Trifásicos.** Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2006. Disponível em: <https://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/maquinas%20e1%C3%A9ctricas%202/aulas%20te%C3%B3ricas/Motores_inducao_tri.pdf>. Acesso em: 29 maio 2024.

FREITAS, Paula Campos Fadul de *et al.* **Análise Comparativa dos Rendimentos dos Motores da Linha Padrão e de Alto Rendimento sob o Enfoque da Eficiência Energética. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos,** Belo Horizonte, p. 1, abr. 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sergio-De-Paula-Silva/publication/271702394_Analise_Comparativa_dos_Rendimentos_dos_Motores_da_Linha_Padrao_e_de_Alto_Rendimento_sob_o_Enfoque_da_Eficiencia_Energetica/links/54cf934a0cf24601c0943641/Analise-Comparativa-dos-Rendimentos-dos-Motores-da-Linha-Padrao-e-de-Alto-Rendimento-sob-o-Enfoque-da-Eficiencia-Energetica.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

GONÇALEZ, Fábio Gonçalves. **“Estudo do motor de indução trifásico e desenvolvimento de um dispositivo de proteção efetiva de motores operando em condições anormais: rotor bloqueado e falta de fase”.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89869/273979.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

GUEDES, Manuel Vaz. **O motor de Indução Trifásico - Seleção e Aplicação**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994. Disponível em:
<https://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/MI_sel&aplic.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

HERINGER, Filipe Thuler. **Análise do comportamento do motor de indução trifásico ligado a rede monofásica utilizando conversor para suprimento de fase**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade Doctum de Caratinga, Caratinga, 2017. Disponível em:
<<https://dspace.doctum.edu.br/handle/123456789/386>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-Circuito**. 2. Ed. Porto Alegre: SAGRA LUZZATTO, 1997. Disponível em:
<<https://pt.slideshare.net/slideshow/curtocircuitogeraldo-kindermannpdf/252573946>>. Acesso em: 26 out. 2024.

KOSOW, Irving Lionel. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

LIMA, Enio Camilo de. **Diagnóstico de motores de indução trifásicos operando em redes desequilibradas e distorcidas**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016. Disponível em:
<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/642/1/tese_lima_2016.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MARDEGAN, Cláudio. Proteção e Seletividade: Capítulo III - Dispositivos de proteção - parte 1. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 28-30, mar 2010. Disponível em:< https://www.osestoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2010/05/Ed50_marco_protecao_seletivida_de_capIII.pdf >. Acesso em: 23 maio 2024.

MATTEDE, Henrique. **Relé falta de fase – O que é e como funciona!** Belo Horizonte, 2016. Disponível em:
<<https://www.mundodaeletrica.com.br/rele-falta-de-fase-o-que-e-como-funciona/>>. Acesso em: 20 maio 2024.

NASCIMENTO, Gustavo Felipe Martin. **Operação de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desbalanceadas sob o enfoque do rendimento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em:
<<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/173669/344104.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

NASCIMENTO JÚNIOR, Geraldo Carvalho do. **Máquinas elétricas: Teoria e Ensaio**. 4. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2011.

NETO, Caroline Soares Rodrigues *et al.* Motores de indução trifásicos para operações industriais. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, São Mateus, v. 9, n. 4, p. 278-289, dez. 2023. Disponível em:
<<https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42440/28940>>. Acesso em: 22 maio 2024.

PAIVA, Marcus. **Máquinas elétricas**: Máquinas de corrente alternada. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, 2022.

PAULILO, Gilson. Qualidade de energia: Capítulo III - Desequilíbrios de tensão. **Revista O Setor Elétrico**. Campinas, p. 42-48, mar. 2013. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2013/03/Ed86_fasc_qualidade_cap3.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

PRADO, Luiz Gustavo Bucca. **Qualidade da energia elétrica no Brasil e os crescentes problemas causados por harmônicos**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade São Francisco, São Paulo, Campinas, 2007. Disponível em: <<https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1367.pdf>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásicos. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 6, n. 2, fev. 2013. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/issue/view/819>>. Acesso em: 22 maio 2024.

SANTOS, A. H. M. *et al.* **Eficiência Energética**. 1. ed. Itajubá: FUPAI, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/272837949_Eficiencia_Energetica_teorica_e_pratica>. Acesso em: 24 dez. 2024.

SANTOS, E. T. A. da C.; SILVA, G. de B. C. **Análise das Influências do Desequilíbrio de Tensão Sobre Conjugado e Rendimento de Motores de Indução Trifásicos**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13526/1/2013_EduardoTeofiloAraujodaCostaSantos_GabrieldeBarcelosConceicaoSilva.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

SEVERO, Dhébora Sayonara de Moraes. **Estudo da máquina de indução trifásica operando com tensões desequilibradas e distorcidas**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/29420/2/EstudoMaquinaIndu%c3%a7%c3%a3o.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2024.

SILVA, Anderson Nascimento da. **Motor de indução trifásico**. Portal IDEA, 2014. Disponível em: <<https://portalidea.com.br/cursos/noes-bsicas-em-motores-eltricos-trifsicos-apostila01.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2024.

TEIXEIRA, Mateus Duarte. Proteção de Sistemas Elétricos: Capítulo III - Relés de Proteção. Universidade Federal do Paraná, 2017. Dispositivos de proteção - parte 1. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 28-30, mar 2010. Disponível em: <http://www.eletr.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te_131_-_capitulo_3.pdf>. Acesso em: 23 maio 2024.

UMANS, S. D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

TEIXEIRA, Mateus Duarte. **Tópicos em Qualidade de Energia: Capítulo VI - Desequilíbrios de tensão e corrente**. Universidade Federal do Paraná, 2019. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/p/_media/professores:mateus:te991_-_desequilibrio_de_tensao.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

TIGGERCOMP. **Sensor de Corrente AC HWCT 5A**. 2024. Disponível em: <<https://tiggercomp.com.br/novaloja2/sensor-de-corrente-ac-hwct-5a?srsltid=AfmBOoraKzmtWy0GsUNcMpt0t6pyJ-hLd21GtYqhpeLVGxWjoytpHF23>>. Acesso em: 24 dez. 2024.

TEODORO, Ricardo Gouveia. **“Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em Redes Elétricas”**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/141-dissertacao_ricardo_gouveia_teodoro.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

TORREZAN, Gabriel F. *et al.* Estudo do desequilíbrio de tensão em um sistema de distribuição. **SBA - Sociedade Brasileira Automática**. São Carlos, v. 1, jul. 2018. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/621>. Acesso em: 26 out. 2024.

TORREZAN, Gabriel Fraga. **Análise de desequilíbrio de tensão em um sistema de distribuição via software OpenDSS**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/5853bb47-cb4b-49ac-aae8-3a2072fb741a/Torrezan_Gabriel_tcc.pdf>. Acesso em: 26 out. 2024.

VOLTAGE DISTURBANCE. **Desequilíbrio corrente: causas, efeitos e proteção**. 2024. Disponível em: <<https://voltage-disturbance.com/power-engineering/power-flow-and-voltage-stability-on-ac-t-ransmission-lines/>>. Acesso em: 26 out. 2024.

WEG. **RW - relés de sobrecarga térmicos**. Jaguará do Sul, 2024. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h3f/h86/WEG-reles-de-sobrecarga-termico-linha-rw-50042397-catalogo-portugues-br-dc.pdf>>. Acesso em: 9 nov. 2024.

WEG. **Relés Eletrônicos Linha Modular**. Jaguará do Sul, 2024. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/haf/hf8/WEG-reles-eletronicos-linha-modular-50066570-pt.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2025.

WEG. **Uso eficiente da engenharia elétrica**. Jaguará do Sul, 2019. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7c/h92/WEG-gestao-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2024.

WILLIAM. **O que é relé de sobrecorrente? Princípio de funcionamento e uso**. 2022. Disponível em: <<https://www.geya.net/pt/contact/>>. Acesso em: 9 nov. 2024.

APÊNDICE A – VERSÃO FINAL DO CÓDIGO DO DISPOSITIVO

```
#include <EmonLib.h> //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA

//VALOR DA CALIBRAÇÃO
#define CURRENT_CAL_1 2.744
#define CURRENT_CAL_2 2.744
#define CURRENT_CAL_3 2.744

//PINOS ANALÓGICOS QUE OS SENSORES ESTÃO CONECTADOS
const int fase1 = A0;
const int fase2 = A1;
const int fase3 = A2;

//CRIA UMA INSTÂNCIA
EnergyMonitor emon1;
EnergyMonitor emon2;
EnergyMonitor emon3;

int faltafase = 2;
int desbal = 7;
int rele = 4;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //INICIALIZA A SERIAL

  //PASSA PARA A FUNÇÃO OS PARÂMETROS (PINO ANALÓGICO / VALOR DE
  CALIBRAÇÃO)
  emon1.current(A0, CURRENT_CAL_1);
  emon2.current(A1, CURRENT_CAL_2);
  emon3.current(A2, CURRENT_CAL_3);
```

```

pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
}

void loop()
{
// Leitura dos sinais
emon1.calcVI(17,100); //FUNÇÃO DE CÁLCULO (17 SEMICICLOS / TEMPO LIMITE
PARA FAZER A MEDIÇÃO)
double currentDraw1 = emon1.Irms; //VARIÁVEL RECEBE O VALOR DE CORRENTE
RMS OBTIDO
Serial.print("Corrente fase 1: "); //IMPRIME O TEXTO NA SERIAL
Serial.print(currentDraw1); //IMPRIME NA SERIAL O VALOR DE CORRENTE MEDIDA
Serial.println("A");//IMPRIME O TEXTO NA SERIAL

emon2.calcVI(17,100);
double currentDraw2 = emon2.Irms;
Serial.print("Corrente fase 2: ");
Serial.print(currentDraw2);
Serial.println("A");

emon3.calcVI(17,100);
double currentDraw3 = emon3.Irms;
Serial.print("Corrente fase 3: ");
Serial.print(currentDraw3);
Serial.println("A\n\n");

//Verificação de falta de fase
if((currentDraw1<=0.1)||((currentDraw2<=0.1)||((currentDraw3<=0.1))
{
digitalWrite(faltafase, HIGH);
digitalWrite(rele, HIGH);
}

```

```
delay(500);
}
else
{
digitalWrite(faltafase, LOW);
digitalWrite(rele, LOW);
delay(500);
}

//Verificação de Motor Desligado
if((currentDraw1<0.05)&(currentDraw2<0.05)&(currentDraw3<0.05))
{
digitalWrite(faltafase, LOW);
digitalWrite(desbal, LOW);
digitalWrite(rele, LOW);
delay(1000);
}

//Verificação de Desbalanço
else if((currentDraw1>(1.05*currentDraw2))||((currentDraw1>(1.05*currentDraw3)))
{
digitalWrite(desbal, HIGH);
digitalWrite(rele, HIGH);
delay(1000);
}
else if((currentDraw2>(1.05*currentDraw1))||((currentDraw2>(1.05*currentDraw3)))
{
digitalWrite(desbal, HIGH);
digitalWrite(rele, HIGH);
delay(1000);
}
else if((currentDraw3>(1.05*currentDraw2))||((currentDraw3>(1.05*currentDraw1)))
{
```

```
digitalWrite(desbal, HIGH);  
digitalWrite(rele, HIGH);  
delay(1000);  
}  
else  
{  
digitalWrite(desbal, LOW);  
digitalWrite(rele, LOW);  
delay(200);  
}
```