



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IDELFONSO DA CRUZ BARRETO

ESTUDO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS VISANDO
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS NO TIMOR-LESTE

Uberlândia-MG

2023

IDELFONSO DA CRUZ BARRETO

**ESTUDO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS VISANDO
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS NO TIMOR-LESTE**

Trabalho de Conclusão de Curso em forma de relatório técnico apresentado à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Curso de Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia – MG

2023

Dare to dream, dare to achieve!

(John C. Maxwell)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos.

Minha profunda gratidão ao Governo de Timor-Leste, ao Ministério de Ensino Superior e ao Fundo de Desenvolvimento de Capital Humano por me concederem esta incrível oportunidade e por terem fornecido apoio financeiro ao longo dos anos dos meus estudos aqui no Brasil. Tenho a esperança de retornar com sucesso, para poder contribuir significativamente para o desenvolvimento do meu país.

Gratidão eterna aos meus pais e irmãos e toda a minha família que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência durante esses anos enquanto eu me dedicava aos estudos e realização deste trabalho.

Agradeço imensamente à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Diretoria de Relações Internacionais e Interinstitucionais (DRII) por todo o apoio desde minha chegada ao Brasil. A UFU proporcionou o ambiente ideal para minha formação acadêmica, enquanto a DRII foi essencial, oferecendo suporte constante e valiosas orientações.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes pela atenção, apoio, incentivo, motivação e orientação que foram importantes para a realização deste trabalho.

Ao Rubinho, nosso dedicado técnico de laboratório, por sua ajuda e orientação nas montagens realizadas no laboratório.

Agradeço aos meus Amigos Timorenses e os colegas da minha turma de graduação que me acompanharam nesta jornada desafiadora, pelas conversas enriquecedoras e apoio nos momentos finais da graduação, pela amizade de anos construída e pela ajuda durante os anos de graduação que foi uma inspiração e exemplo pela trajetória profissional e pessoal.

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para minha trajetória durante meu período de graduação como também minha vida fora dela.

RESUMO

O Trabalho tem como objetivo abordar o tema dos acionamentos de motores de indução trifásicos em aplicações industriais, com foco no estudo do comportamento de quatro tipos de partidas: partida direta, partida estrela triângulo, soft-starter e inversor de frequência. O objetivo principal é analisar as características, vantagens e desvantagens, e aplicação de cada um desses métodos de partida, considerando fatores como desempenho do motor, consumo de energia, vida útil e controle de velocidade. Além disso, este estudo aprofunda a análise sobre a significativa importância do estudo e desenvolvimento de motores elétricos como um elemento crucial para promover o setor industrial em Timor-Leste. Em um contexto em que o país experimenta um notável crescimento econômico, com foco especial na expansão do setor industrial, os motores elétricos emergem como uma peça-chave para estimular o progresso. Através da eficiência e sua aplicabilidade versátil em várias indústrias, esses motores desempenham um papel fundamental na manutenção e crescimento da infraestrutura necessária para impulsionar a economia do país.

PALAVRAS-CHAVE: Motores de Indução Trifásicos; Partida de Motor; Acionamentos; Indústria; Timor-Leste.

ABSTRACT

The objective of this work is to address the topic of three-phase induction motor drives in industrial applications, focusing on the study of the behavior of four types of motor starting methods: direct-on-line starting, star-delta starting, soft starters, and frequency inverters. The main goal is to analyze the characteristics, advantages, disadvantages, and application of each of these starting methods, considering factors such as motor performance, energy consumption, lifespan, and speed control. Furthermore, this study delves into the analysis of the significant importance of the study and development of electric motors as a crucial element for driving the industrial sector in Timor-Leste. In a context where the country is experiencing remarkable economic growth, with a special focus on the expansion of the industrial sector, electric motors emerge as a key component for driving progress. Through their efficiency and versatile applicability across various industries, these motors play a fundamental role in maintaining and growing the infrastructure necessary to boost the country's economy.

KEYWORDS: Three-Phase Induction Motors; Motor Starting; Drives; Industry; Timor-Leste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa da ilha de Timor	5
Figura 2 - Timor-Leste no Mapa Mundi	6
Figura 3 - Taxa de crescimento de PIB do Timor-Leste	12
Figura 4 - Taxa de Inflação de Timor-Leste	12
Figura 5 - Componente de Motor de Indução Trifásico	15
Figura 6 - Motor de rotor bobinado	16
Figura 7 - Representação de campo magnético rotativo.....	17
Figura 8 - vista em corte de um MIT e destaca suas partes principais	18
Figura 9 - Placa de identificação de um motor de indução trifásico.....	19
Figura 10: Motor utilizado neste trabalho. (a) motor utilizado de marca voges ; (b) dados de placa;.....	20
Figura 11 - Circuito Equivalente – Motor de indução trifásico	22
Figura 12 - Ligação estrela	22
Figura 13 - Esquema de montagem do ensaio a vazio.....	23
Figura 14 – Circuito equivalente do ensaio a vazio.....	24
Figura 15 - Esquema de montagem do ensaio de rotor bloqueado.....	26
Figura 16 - Circuito equivalente do ensaio de rotor bloqueado.....	26
Figura 17 - Circuito equivalente com todos os parâmetros	28
Figura 18 - Curva de Conjugado x Velocidade	30
Figura 19 – Circuito de potência da chave de partida direta com reversão	34
Figura 20 – Circuito de comando da chave de partida direta com reversão.....	35
Figura 21 – Chave de partida direta. (a) painel de acionamentos; (b) resultados experimentais; (c) simulação digital; (d) corrente do estator; (e) velocidade e conjugado motor e conjugado de carga em pu; (f) corrente do rotor no referencial rotórico.....	36
Figura 22 – Chave de partida estrela-triângulo.....	38
Figura 23 – Chave de partida estrela-triângulo.....	39
Figura 24 – Chave de partida estrela-triângulo.....	40
Figura 25 – (a) Fechamento em estrela; (b) Fechamento em triângulo.....	40
Figura 26 – Montagem prática da partida estrela-triângulo; (a) montagem feitas na bancada do laboratório; (b) Curva de tensão e corrente durante a partida do motor em estrela;	

(c) Curva da corrente de linha do motor durante a transição de estrela para triângulo; (d) Curvas de corrente e tensão logo após a transição de estrela para triângulo.	41
Figura 27 - Resultados de simulação da chave de partida estrela-triângulo; (a) simulação da chave de partida estrela-triângulo no software Matlab/Simulín®; (b) tensões trifásicas; (c) correntes estatóricas; (d) correntes rotóricas; (e) Curva da velocidade em pu. (f) curvas de torque x velocidade em pu.....	42
Figura 28: Chave de partida soft-starter SSW-07	44
Figura 29: Aplicação da chave de partida soft-starter no acionamento de motores; (a) bancada de acionamentos; (b) foto das conexões na SSW-07;	46
Figura 30: Aplicação da chave de partida soft-starter no acionamento de motores; (a) bancada de acionamentos; (b) foto das conexões na SSW-07; (c) forma de onda da tensão; (d) forma de onda da corrente	46
Figura 31 - Resultados de simulação da chave de partida soft-starter.....	47
Figura 32 - Bloco de diagrama simplificado de inversor da frequência.....	51
Figura 33 - aplicação do controle vetorial em motores; (a) bancada de acionamentos; (b) tensões de linha a 60 Hz; (c) tensão chaveada a 60 Hz; (d) tensão e corrente de linha a 60 Hz; (e) correntes de linha a 60 Hz; (f) tensão e corrente de linha 60 Hz; (g) tensão e corrente de linha a 75 Hz; (h) tensão e corrente de linha a 90 Hz;.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de placa de identificação com os valores.....	21
Tabela 2 - Valores da Resistência.....	23
Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio a vazio	24
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de rotor bloqueado	27
Tabela 5 - Resultados obtidos dos parâmetros	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADB	Asian Development Bank
ADO	Asian Development Outlook
ANP	Autoridade Nacional d Petroleo
CNC	Controle Numérico Computarizado
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JPDA	Join Petroleum Development Area
MIT	Motor de Indução Trifásico
RAEOA	Região Administrativa Especial Oecusse Ambeno
RDTL	República Democrática de Timor-Leste
VFD	Variable Frequency Drive
WFP	World Food Programme

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo Geral.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho	3
2. DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL EM TIMOR-LESTE.....	5
2.1 República Democrática de Timor-Leste	5
2.2 O desenvolvimento industrial em Timor-Leste e a importância dos motores elétricos	7
2.3 Marcas de Motores elétricos mais utilizadas em Timor-Leste	9
2.4 Economia e Indústrias de Timor-Leste.....	10
2.5 Impacto de Pandemia para as Indústrias em Timor-Leste	13
2.6 Conclusão.....	13
3. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	15
3.1 Descrição dos motores de indução trifásicos	15
3.2 Princípio de funcionamento	17
3.3 Ensaio do Motor de Indução Trifásico	20
3.3.1 Leitura do Valor das resistências de fase	22
3.3.2 Ensaio a vazio	23
3.3.3 Ensaio de rotor bloqueado	25
3.4 Considerações Finais	30
4. PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	32
4.1 Chave de Partida Direta.....	32
4.1.1 Descrição do método de partida direta	32
4.1.2 Análise prática da chave de partida direta.....	35
4.1.3 Vantagens e desvantagens da partida-direta	37

4.2 Chave da partida estrela-triângulo	37
4.2.1 Descrição do método de partida estrela-triângulo.....	38
4.2.2 Análise prática de partida estrela-triângulo	450
4.2.3 Vantagens e desvantagens da partida estrela-triângulo.....	483
4.2.4 Principais aplicações de partida de estrela-triângulo	493
4.3 Chave da partida soft-starter	44
4.3.1 Descrição do Soft-starter.....	45
4.3.2 Análise prática de soft-starter	45
4.3.3 Vantagens e desvantagens de soft-starter.....	48
4.3.4 Principais aplicações de soft-starter	49
4.4 Acionamento do MIT por Inversor.....	49
4.4.1 Descrição de inversor de frequência	50
4.4.2 Métodos de controle dos inversores de frequência	52
4.4.3 Análise prática do inversor	52
4.4.4 Vantagens e Desvantagens do inversor.....	54
4.4.5 Principais aplicações de inversor	55
4.5 Considerações finais	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O crescimento socioeconômico de um país está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento industrial, sendo este setor de extrema importância para propulsão a economia. Os motores de indução trifásicos emergem como uma ferramenta amplamente aplicada nas indústrias, desempenhando um papel crucial no impulsionamento da economia nacional e contribuindo para o crescimento e desenvolvimento do setor industrial como um todo.

Esses motores possuem características técnicas e operacionais que os tornam altamente eficientes, sendo adequados para atender às demandas das indústrias. Sua capacidade de gerar torque de forma constante e controlada, aliada à confiabilidade e durabilidade, os tornam uma escolha preferencial para diversos processos produtivos. Além disso, a utilização desses motores possibilita uma maior automatização dos sistemas industriais, otimizando os processos produtivos e aumentando a produtividade. A eficiência energética proporcionada pelos motores de indução trifásicos contribui para a redução de custos operacionais, tornando as indústrias mais competitivas no mercado global.

A indústria desempenha um papel fundamental na geração de empregos e no aumento da renda da população. Através do desenvolvimento industrial estimulado pelos motores de indução trifásicos, é possível criar um ambiente propício para a inovação tecnológica, atraindo investimentos e fomentando o crescimento econômico do país. Nesse sentido, políticas públicas voltadas para o estímulo e desenvolvimento do setor industrial, com ênfase na utilização dos motores de indução trifásicos, são essenciais para promover o crescimento socioeconômico sustentável. Investimentos em infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento, e capacitação profissional são fundamentais para incentivar a competitividade das indústrias nacionais, fortalecendo o posicionamento do país no mercado global.

Em suma, o crescimento socioeconômico de um país é indissociável do desenvolvimento industrial, e a utilização dos motores de indução trifásicos desempenha um papel crucial nesse processo. O investimento nesse setor estratégico proporciona não apenas o encorajar a economia, mas também a geração de empregos, o aumento da renda da população e a criação de um ambiente propício para a inovação e o desenvolvimento tecnológico. É necessário, portanto, que sejam adotadas políticas públicas adequadas e estratégicas para alavancar o setor industrial e impulsionar o crescimento socioeconômico do país. Portanto, é fundamental que os governos invistam em inovações avançadas, como os motores elétricos para

impulsionar o progresso industrial e, conseqüentemente, promover o crescimento socioeconômico do país.

O motor de indução trifásico desempenha um papel fundamental nas aplicações industriais modernas, impulsionando processos em diversos setores, desde a manufatura até a automação. Sua importância na funcionalidade industrial é crucial, enfatizando a necessidade de selecionar o método de partida mais adequado para garantir eficiência operacional e confiabilidade do sistema. Os motores elétricos são amplamente empregados em diversas situações, desde aparelhos eletroeletrônicos residenciais, como geladeiras, aspiradores e liquidificadores, até na indústria em geral, onde fornecem a força necessária para movimentar máquinas de grande porte, locomotivas, esteiras e uma variedade de outras aplicações (CHAPMAN, 2013)

Um dos principais desafios associados ao Motor de Indução Trifásico (MIT) reside em seu processo de inicialização, pois requer uma considerável quantidade de energia, o que, por sua vez, demanda níveis elevados de corrente. Isso não apenas impõe carga adicional ao MIT, mas também sobrecarrega a rede elétrica. Existem várias abordagens para acionar um MIT, sendo as mais comuns a Partida Direta, Partida Estrela-Triângulo e Partida Suave (Soft-Starter). O estudo de conversores de frequência também é bastante relevante e de crucial importância nos acionamentos industriais. O estudo consiste em uma análise teórica e prática da partida de um MIT. Essa análise envolve a comparação das curvas das grandezas elétricas, como corrente, tensão e outras, com o objetivo de entender o comportamento do motor durante esse processo.

Além do caráter técnico e científico, o trabalho também aborda as questões relacionadas aos aspectos econômicos do Timor-Leste, e como a aplicação de motores de indução impulsionam o crescimento industrial e tecnológico deste jovem país. O desenvolvimento industrial em Timor-Leste é um dos principais pilares para o crescimento econômico do país. A economia timorense depende fundamentalmente do setor industrial, principalmente na indústria petrolífera e gás natural, que representa mais de 80% da atividade (Marçal 2017). O estudo de motores elétricos tem uma forte correlação com o desenvolvimento industrial em Timor-Leste através da melhoria da eficiência energética, produtividade, desenvolvimento de novas tecnologias e incentivar as indústrias locais.

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aprofundar o estudo das partidas de motores de indução trifásicos em aplicações industriais. Esta pesquisa é conduzida mediante de análises práticas realizadas no laboratório e simulações efetuadas no software MATLAB®. Com essa abordagem, realmente procura analisar os diferentes comportamentos das partidas, avaliando sua eficiência, custo e aplicabilidade nas indústrias.

O estudo visa também identificar as vantagens e desvantagens inerentes a essas partidas em aplicações industriais. O motor de indução trifásico é amplamente utilizado em diversos setores industriais, tornando-se essencial compreender como as partidas afetam seu desempenho e eficácia. Através da combinação de métodos práticos e simulações computacionais, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e econômicas no contexto industrial.

De forma geral, é também objetivo deste trabalho disponibilizar conhecimentos técnicos na área de motores industriais para operadores e empresas do setor. Esses conhecimentos são considerados ativos essenciais que promovem otimização e eficiência nos processos industriais. Ao fornecer descobertas específicas sobre partidas de Motores de Indução Trifásicos (MIT) busca-se contribuir para aprimorar práticas operacionais e promover avanços na eficiência de sistemas industriais.

1.3 Estrutura do Trabalho

No decorrer do primeiro capítulo do estudo será demonstrada a introdução do trabalho. Inicialmente será realizada uma contextualização, destacando a relevância do assunto. Em seguida, serão delineados os objetivos gerais da pesquisa, visando compreender e analisar o impacto desses motores no contexto específico de Timor-Leste. Por fim, será esboçada a estrutura do trabalho, proporcionando uma visão geral dos tópicos que serão abordados ao longo do estudo.

No segundo capítulo do estudo, serão abordados os principais assuntos relacionados ao desenvolvimento industrial e a importância dos motores de indução no Timor-Leste. Além disso, serão discutidos os motores de indução trifásicos mais comuns nas indústrias timorenses, bem como a economia e as indústrias do país. O capítulo também tratará do impacto da pandemia de Covid-19 nas indústrias em Timor-Leste. A análise desses tópicos é fundamental para entender o cenário industrial e econômico do país e suas perspectivas futuras.

No terceiro capítulo, serão contemplados sobre os motores de indução trifásicas, suas aplicações e princípios basilares, bem como os diferentes tipos de motores de corrente alternada e seu funcionamento. Além disso, serão estudados os ensaios realizados em laboratório para a leitura da resistência do estator, incluindo os ensaios em vazio e o ensaio de rotor bloqueado. Esses ensaios são essenciais para avaliar o desempenho e a eficiência dos motores, fornecendo informações importantes para o projeto e a manutenção desses equipamentos industriais. O conhecimento desses aspectos técnicos é fundamental para a compreensão e o desenvolvimento de sistemas elétricos industriais eficientes e confiáveis.

No quarto capítulo, serão explorados o comportamento e as características das partidas do motor de indução trifásico, abrangendo a partida direta, partida estrela-triângulo, soft-starter e inversor. Este estudo envolverá análises teóricas para compreender melhor cada partida, suas aplicações, vantagens e desvantagens, além de investigações práticas realizadas em laboratório serão conduzidas também as simulações no software Matlab/Simulink®, permitindo a obtenção de curvas que proporcionarão uma compreensão aprofundada das peculiaridades do motor de indução em distintas condições de partida.

Finalizando, as conclusões do trabalho serão apresentadas no capítulo 5. Os principais resultados e descobertas serão resumidos, destacando as contribuições para o entendimento do motor de indução trifásico e suas técnicas de partida. Também serão discutidas possíveis áreas para pesquisas futuras relacionadas a esse tema.

2. DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL EM TIMOR-LESTE

Neste capítulo, a intenção é aprofundar o conhecimento sobre a importância de motores elétricos e a sua utilização em indústrias no Timor-Leste. Será abordado também a história do país e suas características peculiares, ao mesmo tempo em que se explora a importância dos motores elétricos nas indústrias locais e suas contribuições fundamentais para o desenvolvimento econômico do país.

2.1 República Democrática de Timor-Leste

Timor-Leste, oficialmente conhecido como República Democrática de Timor-Leste (RDTL), é um pequeno país localizada no sudeste da Ásia, ocupando a metade oriental da ilha de Timor, juntamente com os enclaves de *Oecusse* e *Ataíro* (Marçal, 2017).

A Ilha de Timor tem uma área total cerca de 30.000 km² e está dividida em duas partes: Timor Ocidental, uma colônia holandesa, que hoje faz parte da Indonésia conforme mostrado na figura 1, e Timor Leste, anteriormente conhecido como Timor português, e agora conhecido como Timor-Leste ou *Timor Lorosa'e* no idioma *Tétum*. O Timor-Leste destaca-se como um dos estados mais jovens no mundo (Kingsbury, 2015), com uma área total de 15.007 km² (menor que o estado de Sergipe, o menor estado brasileiro). Possui fronteira terrestre apenas com a Indonésia (Durand, 2010).

Figura 1 - Mapa da ilha de Timor



Fonte: East Timor Law and Justice bulletin

<https://www.easttimorlawandjusticebulletin.com/2012/11/mp-calls-for-courts-in-all-thirteen.html>

Como mostrado na figura 1, o território está dividido administrativamente em 12 Municípios, e uma região autônoma conhecido como *Oécusse* (RAEOA), trata-se de um enclave localizado na parte ocidental da ilha, território da Indonésia, e duas pequenas ilhas *Ataúro* e *Jaco* (PEDN, 2011). A figura 2 traz a posição geográfica do Timor-Leste, sua bandeira e cores nacionais.

Timor-Leste abriga uma população de aproximadamente 1,3 milhão de pessoas, e sua narrativa histórica é um poderoso testemunho da inquebrantável luta do povo pela soberania, independência e liberdade. A trajetória do país é marcada por atos de extraordinária bravura e resiliência, destacando-se na resistência contra o jugo colonial.

Figura 2 - Timor-Leste no Mapa Mundi



Fonte: Dreams Time (<https://pt.dreamstime.com/ilustra%C3%A7%C3%A3o-stock-mapa-de-timor-leste-em-um-mapa-do-mundo-com-o-ponteiro-da-bandeira-e-do-mapa-ilustra%C3%A7%C3%A3o-do-vetor-image85693227>)

No período pré-colonial, Timor-Leste era habitado por diversas comunidades étnicas e grupos linguísticos, resultando em uma região com uma história cultural rica e diversificada.

A colonização portuguesa teve início no século XVI, quando os exploradores portugueses chegaram à ilha em 1515. Ao longo de mais de 400 anos, Timor foi uma colônia portuguesa, exercendo uma profunda influência em sua cultura, língua e religião (Silva, 2018).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o Japão ocupou Timor entre 1942 e 1945, expulsando os portugueses e deixando um impacto significativo na população e infraestrutura local. Após a Segunda Guerra Mundial, os portugueses tentaram reafirmar seu domínio sobre Timor-Leste, enfrentando movimentos de resistência à sua presença.

Em 1975, Timor-Leste declarou sua independência de Portugal. No entanto, em dezembro do mesmo ano, a Indonésia ocupou o Timor-Leste, desencadeando oposição e resistência persistente ao longo de décadas.

Em 1999, mediado pela ONU, um referendo foi conduzido, resultando na expressiva votação da maioria dos timorenses a favor da independência. Essa conquista foi oficializada em 20 de maio de 2002, marcando o estabelecimento do Timor-Leste como um País independente, chamada República Democrática do Timor-Leste, tornando-se a primeira nação no século XXI. Apesar desse marco histórico, o país ainda enfrenta desafios significativos na reconstrução de sua infraestrutura, economia e estrutura governamental, devido aos anos de ocupação (Kingsbury, 2013).

Após conquistar a independência em 2002, Timor-Leste adotou o Português e o Tétum como línguas oficiais. O tétum é uma língua *austronésia* de origem Taiwanesa, que é falada localmente, é uma família linguística que abrange um vasto grupo de línguas faladas em uma extensa região que se estende por partes do Sudeste Asiático, Oceania e regiões adjacentes. A escolha do Português como idioma oficial do Timor-Leste é devido à herança colonial portuguesa, estabelecendo a língua como símbolo de identidade nacional e facilitando a integração com a Comunidade dos Países de Língua Portuguesa (CPLP).

2.2 O desenvolvimento industrial em Timor-Leste e a importância dos motores elétricos

Motores elétricos desempenham um papel crucial no desenvolvimento industrial em Timor-Leste. Eles oferecem várias vantagens que podem impulsionar o crescimento econômico do país, reduzir custos e melhorar a eficiência. Para aproveitar ao máximo os benefícios dos motores elétricos no desenvolvimento industrial, é essencial que o Governo Timor-Leste invista em infraestrutura elétrica confiável, promova a capacitação técnica em eletricidade e tecnologia industrial e incentive a utilização de tecnologias de ponta em processos industriais (Baptista, 2015).

Investimentos em força motriz é uma parte fundamental do esforço de Timor-Leste para diversificar sua economia, melhorar a eficiência e criar uma base sólida para o crescimento industrial sustentável. De acordo com o Ministério do Comércio, Indústria e Ambiente, a economia de Timor-Leste tem sua base no crescimento de três indústrias críticas: agricultura, turismo e petróleo (Ministério do Comércio, Indústria e Ambiente de Timor-Leste, 2023). Atualmente, o setor de energia do país depende principalmente de motores a diesel que utilizam fontes não-renováveis e altamente poluentes como combustível. O governo tem lançado

programas de desenvolvimento industrial, que incluem o treinamento de pequenas empresas, educação técnica e profissional e treinamento no exterior.

Em relação ao uso de motores elétricos para promover o desenvolvimento do país e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, há potencial para crescimento no mercado de veículos elétricos. Entretanto, o governo ainda não implementou iniciativas significativas para incentivar o uso de motores elétricos em outros setores, uma vez que as políticas públicas estão concentrando esforços no desenvolvimento de parques industriais.

Os motores elétricos, em particular os motores de indução trifásicos, são amplamente utilizados em toda indústria em Timor-Leste devido à sua eficiência, versatilidade e baixo custo. Eles podem ser aplicados em uma variedade de indústrias, incluindo transporte, manufatura, automação, construção e alimentos.

Para promover o desenvolvimento industrial e a utilização de motores elétricos em Timor-Leste, o IX Governo Constitucional do país está implementando uma série de medidas significativas, que incluem:

- **Incentivos Fiscais:** O governo oferecer incentivos fiscais para às empresas locais tanto para empresas internacionais, para a utilização dos motores elétricos, como redução de impostos ou isenções de taxas.
- **Programas de Capacitação:** O governo fornecer programas de treinamento para empresas e trabalhadores, permitindo que eles adquiram habilidades necessárias para operar e manter motores elétricos. Isso não apenas aumentaria a demanda por esses motores, mas também promoveria o desenvolvimento de habilidades técnicas no país.
- **Parcerias com Empresas Estrangeiras:** O governo está a buscar parcerias com empresas estrangeiras, principalmente de países como China, Japão, Indonésia e Austrália, que possuem conhecimento e tecnologia em motores elétricos.
- **Investimento em Infraestrutura:** O governo está investindo em infraestrutura que suporte a utilização de motores elétricos, incluindo redes elétricas mais eficientes. Essa infraestrutura tornaria a utilização de motores elétricos mais viável e incentivaria o crescimento de novas indústrias.
- **Conscientização:** O governo está realizando campanhas de conscientização sobre os benefícios da utilização de motores elétricos, tanto para empresas quanto para a população em geral. Isso aumentaria a demanda por essa tecnologia e promoveria o desenvolvimento industrial.

É importante ressaltar que, embora a utilização de motores elétricos contribui para o desenvolvimento industrial em Timor-Leste, o país ainda enfrenta desafios significativos em termos de infraestrutura e recursos. Portanto, esforços conjuntos do governo e do setor privado são essenciais para impulsionar o desenvolvimento industrial e a adoção de motores elétricos, ajudando assim a fortalecer a economia do país.

Os setores-chave da economia Timorense que aplicam motores elétricos em seus processos são: indústria petrolífera e de gás, indústria de transformação, manufatureiras e agricultura, construção civil e serviços. (Baptista, 2015). Em cada uma dessas áreas, os motores elétricos desempenham funções essenciais, como sistemas de bombeamentos, compressores, máquinas-ferramenta, transportadores, tração elétrica, equipamentos de construção, elevadores e sistemas de ar-condicionado, dentre outros.

Essa adoção de motores elétricos traz consigo diversas vantagens em relação aos motores a combustão. Primeiramente, os motores elétricos são mais eficientes, o que resulta na redução dos custos de energia. Além disso, eles são mais sustentáveis, já que não produzem emissões prejudiciais, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar. Outro ponto positivo é que esses motores são menos ruidosos, o que ajuda a diminuir a poluição sonora nas áreas industriais.

Desta forma, pode-se perceber que motores elétricos desempenham papel fundamental no desenvolvimento industrial do Timor-Leste reduzindo custos de produção, agregando valor aos produtos, promovendo sustentabilidade e contribuindo para o crescimento econômico do país.

2.3 Marcas de Motores elétricos mais utilizadas em Timor-Leste

Timor-Leste não possui uma marca própria de motores elétricos; entretanto, os motores mais amplamente utilizados são provenientes de marcas japonesas, chinesas e de outros países vizinhos da Ásia. Aqui estão as marcas de motores elétricos frequentemente utilizadas nas indústrias em Timor-Leste:

- Hitachi: É uma empresa japonesa que fabrica motores elétricos para diversas aplicações industriais. É uma marca amplamente reconhecida em Timor-Leste como um acionador de várias máquinas industriais.
- Siemens: A Siemens é uma empresa alemã que fabrica uma ampla variedade de motores elétricos para diversas aplicações industriais. A empresa oferece motores

elétricos síncronos e assíncronos, motores de alta e baixa tensão, motores de corrente contínua e motores de ímã permanente, geralmente a marca mais utilizada em Timor-Leste são motores de indução trifásicos da série 1LE0001.

- **Elektrim:** A Elektrim Motors é uma empresa que projeta e fabrica motores elétricos de corrente alternada em configurações IEC e NEMA, com potência que varia de frações de cavalos de potência até 6.300 cavalos de potência.
- **Mitsubishi Electric Corporation:** É um fabricante de motores elétricos renomado, com uma participação de mercado de 14,8% no Japão. Eles produzem uma variedade de motores industriais, incluindo motores síncronos e de indução, com foco na eficiência energética.
- **Yaskawa Electric Corporation:** É um fabricante de motores elétricos estabelecido, conhecido por sua confiabilidade, alta qualidade e custo-benefício. Eles se especializam na produção de motores AC, motores DC e motores servo usados em robótica e sistemas de automação.
- **TECO:** É uma marca renomada de motores elétricos na Indonésia e conseguiu diversificar com sucesso para o setor de desenvolvimento subterrâneo, altamente competitivo, com operações comerciais em todo o mundo, incluindo eletrificação em máquinas.

Embora essas marcas sejam frequentemente utilizadas nas indústrias em Timor-Leste, é importante lembrar que o uso de marcas específicas de motores elétricos pode variar dependendo do tipo de indústria e das aplicações em questão.

2.4 Economia e Indústrias de Timor-Leste

O desenvolvimento industrial desempenha um papel crucial no crescimento econômico de Timor-Leste, sendo que o setor industrial é dominado pela indústria petrolífera e do gás natural e estas indústrias respondem por cerca de 80% da produção industrial do país. A economia timorense é uma economia em desenvolvimento. O país enfrenta desafios como a pobreza, o desemprego e a falta de infraestrutura. No entanto, o país tem um grande potencial de crescimento, com recursos naturais abundantes e uma população jovem e trabalhadora.

Embora o desenvolvimento industrial seja considerado um dos principais pilares para o crescimento econômico do país é importante reconhecer que a economia timorense em geral se baseia nos três pilares principais: petróleo, agricultura e turismo. A agricultura é um setor

importante, com a produção de café, grãos e nozes. O café é o principal produto de exportação, representando 80% da receita de exportação do país, excluindo o petróleo.

Timor-Leste busca desenvolver uma economia moderna e diversificada, aportando investimentos em três indústrias principais: agricultura, turismo e petróleo. O país possui vantagens consideráveis nessas áreas devido a recursos naturais, localização geográfica e perfil econômico. Além das indústrias principais, há um foco na agroindústria para criar subprodutos de excelência com potencial de exportação. O governo pretende promover o desenvolvimento industrial planejado para aumentar a oferta de bens de consumo, criar empregos, valorizar o setor primário, desenvolver pequenas e médias empresas, e contribuir para a redução da dependência de importações, tudo enquanto preserva o meio ambiente.

Principais ações propostas pelo governo incluem a finalização da Política Nacional de Desenvolvimento da Indústria, revisão do quadro legal, apoio a pequenas indústrias, instalação de unidades de produção industrial, desenvolvimento de parques industriais, introdução de novas tecnologias, formação empresarial, parcerias com o setor privado, investimento em projetos industriais locais, expansão da indústria de reciclagem, e reforço da legislação ambiental. O governo está apoiando os produtores de café, ajudando-os a comprar melhores máquinas de descasque. O turismo também está crescendo, e o governo está investindo na construção de infraestrutura, como aeroportos, portos, estradas e sistemas de abastecimento de água. O petróleo é outro setor importante da economia, e o governo desenvolveu um sistema de gestão de receitas de petróleo e gás de classe mundial.

Além disso, a economia de Timor-Leste também se baseia na produção de cacau, cravo e coco. Timor-Leste tem um dos PIB per capita mais baixos do mundo e enfrenta desafios significativos de desenvolvimento humano, como crescimento demográfico, mortalidade infantil, desnutrição, desemprego, iliteracia e insegurança alimentar no Sudeste Asiático.

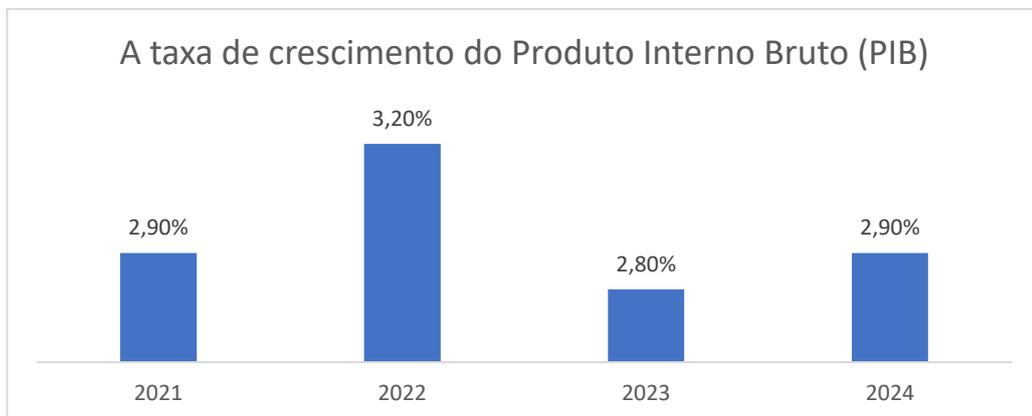
Timor-Leste é um Estado costeiro com uma extensa zona marítima, vital para sua identidade e subsistência. Os oceanos têm significado espiritual e são essenciais para pesca, turismo e economia. De acordo com programa de IX Governo constitucional (2023), após acordos de fronteiras marítimas, o país busca desenvolvimento sustentável (Agenda 2030 da ONU).

O governo está focado na Economia Azul, promovendo setores ligados aos mares e oceanos de forma sustentável, visando crescimento econômico e preservação ambiental. Este enfoque reforçará a identidade marítima e cultura timorense, promovendo internacionalmente o desenvolvimento sustentável de Timor-Leste. A produção de gás e petróleo gera as receitas

mais elevadas, mas não tem forte capacidade para criar empregos locais, dado o grande número de trabalhadores internacionais nas empresas estrangeiras autorizadas a explorar o recurso.

As perspectivas econômicas para Timor-Leste, de acordo com o Relatório de Perspectivas de Desenvolvimento Asiático (ADO) de setembro de 2023, mostram um cenário de crescimento e estabilidade, conforme apresentado na figura 3. O Produto Interno Bruto (PIB) do país é esperado para crescer a uma taxa de 2,8% em 2023 e 2,9% em 2024, indicando um aumento gradual na atividade econômica, como mostrado na figura 3.

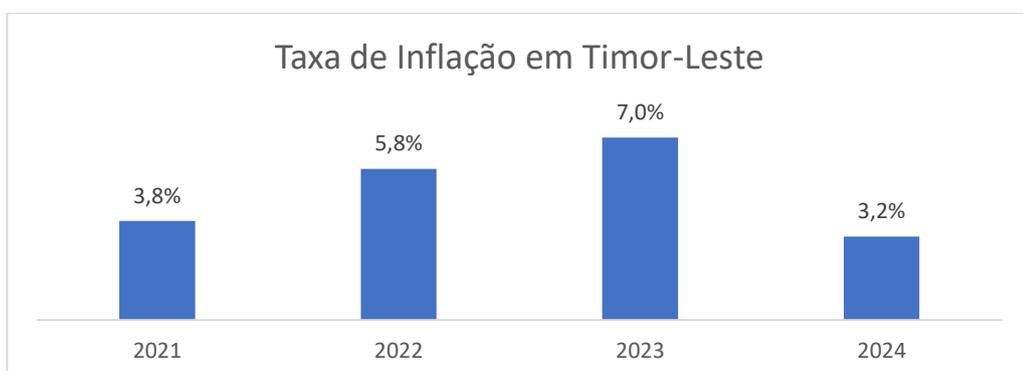
Figura 3 - Taxa de crescimento de PIB do Timor-Leste



Fonte: Asian Development Bank. (<https://www.adb.org/where-we-work/timor-leste/economy>)

No entanto, vale notar que as taxas de inflação também estão em foco, com uma projeção de 5,8% em 2023, seguida de uma queda para 3,3% em 2024. Essas taxas de inflação podem influenciar os preços e o poder de compra dos cidadãos timorenses nos próximos anos, sendo um ponto de atenção para governo e responsáveis pela política econômica do país, como mostrado na figura 4.

Figura 4 - Taxa de Inflação de Timor-Leste



Fonte: Asian Development Bank. (<https://www.adb.org/where-we-work/timor-leste/economy>)

No entanto, vale notar que as taxas de inflação também estão em foco, com uma projeção de 5,8% em 2023, seguida de uma queda para 3,3% em 2024. Essas taxas de inflação podem influenciar os preços e o poder de compra dos cidadãos timorenses nos próximos anos, sendo um ponto de atenção para governo e responsáveis pela política econômica do país, como mostrado na figura 4.

2.5 Impacto de Pandemia para as Indústrias em Timor-Leste

No contexto pós-pandemia, este estudo também busca analisar como a indústria de Timor-Leste tem se adaptado. Segundo (Neves, 2020), a pandemia de COVID-19 afetou gravemente a economia global e Timor-Leste não foi exceção. Entender as adaptações necessárias neste período pode fornecer percepções valiosos para o futuro da indústria no país.

A pandemia COVID-19 afetou significativamente as indústrias em Timor-Leste. O setor privado, em particular as micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), foi duramente atingido pela pandemia, com 81% das MPMEs relatando perda de renda, 26% relatando dificuldade em pagar funcionários e 65% relatando queda na demanda. A pandemia causou uma contração significativa na economia local, com Timor-Leste experimentando a maior contração do PIB desde sua independência. As restrições e bloqueios introduzidos pelo governo para prevenir a propagação da COVID-19, juntamente com a desaceleração econômica global e a incerteza dos preços do petróleo, mergulharam a economia local em uma contração severa.

O impacto da pandemia foi agravado pelos efeitos das mudanças climáticas, com Timor-Leste sendo atingido por inundações em larga escala em abril de 2021. A pandemia também destacou e agravou as fraquezas subjacentes do sistema de saúde de Timor-Leste, que tem sido um desafio persistente no país

Em resumo, a pandemia COVID-19 afetou significativamente as indústrias em Timor-Leste, especialmente o setor privado. No entanto, há sinais de recuperação na economia, e o governo e organizações internacionais estão trabalhando para melhorar a situação.

2.6 Conclusão

Em suma, o desenvolvimento industrial em Timor-Leste ressalta a crucial importância dos motores elétricos como catalisadores essenciais para impulsionar a economia do país. A contribuição da indústria para o crescimento econômico de Timor-Leste é evidente por meio da diversificação econômica, geração de empregos, aumento da produtividade e atração de investimentos estrangeiros.

O desenvolvimento sustentável da indústria não apenas impulsiona a economia, mas também fortalece a resiliência do país frente a desafios econômicos. Com uma abordagem estratégica e políticas favoráveis, a expansão da indústria emerge como um propulsor para o progresso socioeconômico duradouro em Timor-Leste.

Ao explorar os avanços na integração dessa tecnologia nas operações industriais, torna-se evidente que os motores elétricos não apenas fomentam a eficiência e inovação, mas também desempenham um papel fundamental na busca por um crescimento econômico sustentável. Esta análise reforça a perspectiva de que o investimento estratégico em tecnologias elétricas é um componente-chave para o desenvolvimento industrial bem-sucedido e duradouro em Timor-Leste.

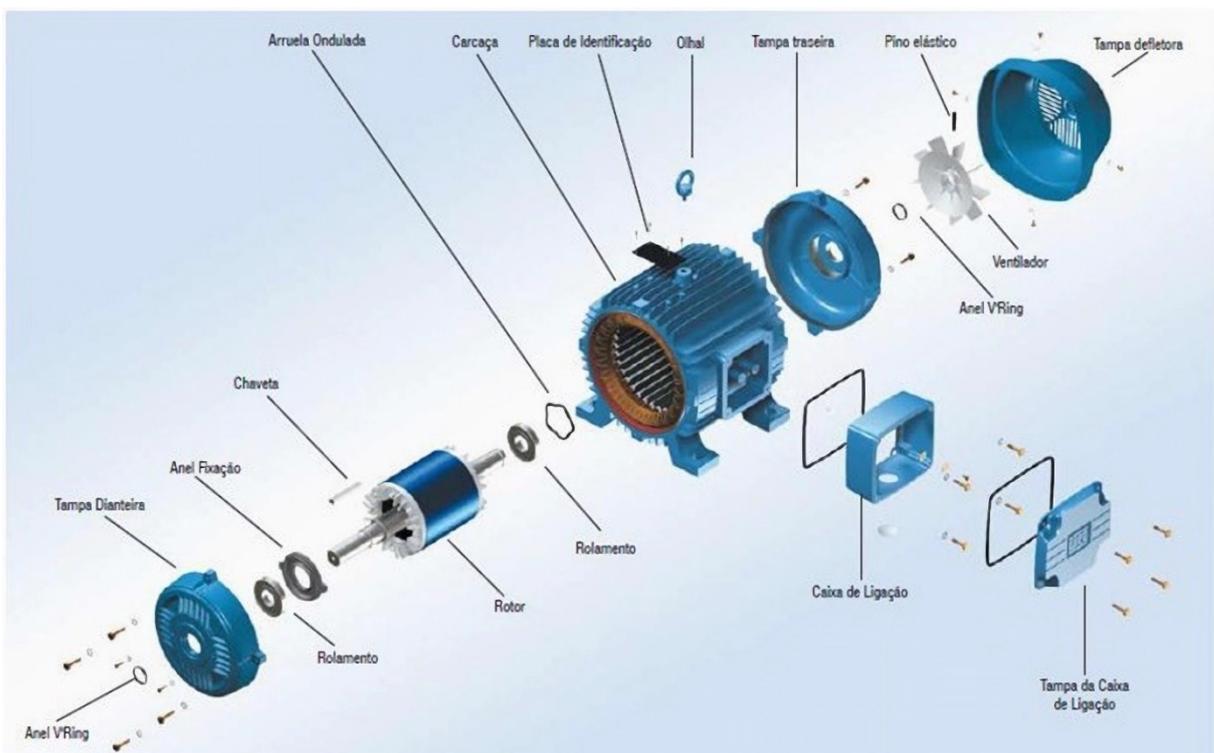
3. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Nesse capítulo explora-se o estudo dos motores de indução trifásicos, abordando seu funcionamento, tipos e os ensaios realizados no laboratório. Essa análise visa fornecer conhecimentos cruciais sobre desempenho desses motores em diferentes contextos industriais.

3.1 Descrição dos motores de indução trifásicos

Os motores de indução trifásicos são dispositivos eletromagnéticos amplamente utilizados em diversos setores industriais devido à sua confiabilidade e eficiência (Smith, 2018). Há basicamente dois tipos de motores de indução trifásicos, e essa classificação ocorre com base na tecnologia na construção de seus rotores: rotor gaiola e rotor bobinado. Sendo que os primeiros são a grande maioria das aplicações industriais. A figura 5 apresenta as partes do motor de indução do tipo gaiola.

Figura 5 - Componente de Motor de Indução Trifásico



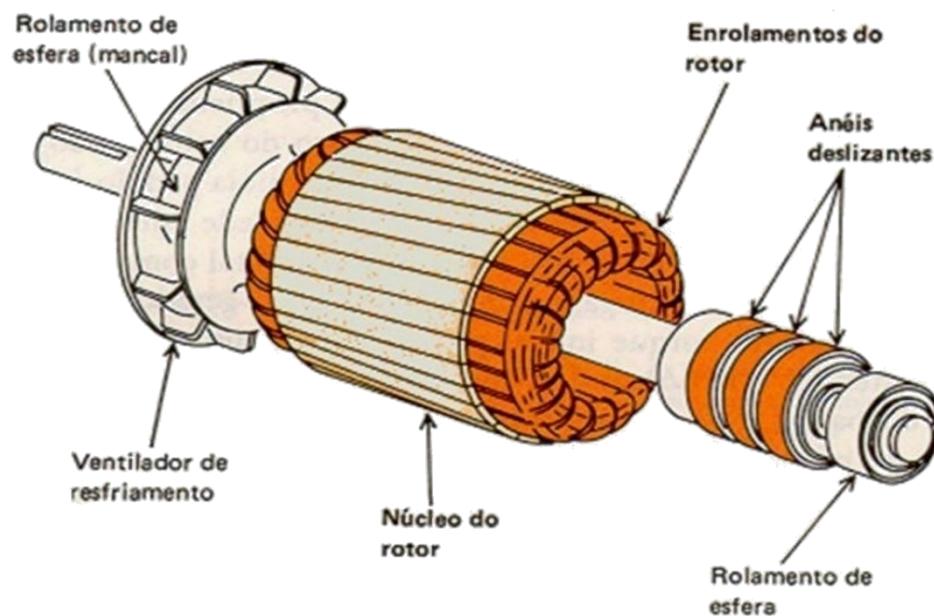
Fonte: Empresa WEG. (<https://www.weg.net>)

Os motores de indução do tipo gaiola são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações industriais e comerciais devido à sua eficiência notável, que pode alcançar até 97%. Além disso, é de fácil manutenção e tem custos de produção acessíveis. Isso faz dele o tipo mais comum de motor elétrico disponível. O rotor é constituído por barras feitas de material

condutor dispostas em torno do conjunto de lâminas do rotor, conectadas por anéis metálicos nas extremidades. Essa configuração de motor apresenta um alto torque de partida e uma corrente de partida reduzida, como mostrado na figura 5.

Os motores de rotor bobinado, figura 6, são aqueles cujas bobinas do rotor podem ser conectadas externamente para ajustar a velocidade e o torque (Fitzgerald, 2003). São encontrados em máquinas que requerem controle fino da velocidade, como máquinas têxteis e impressoras.

Figura 6 - Motor de rotor bobinado



Fonte: Empresa WEG. (<https://www.weg.net>) com adaptações

As principais grandezas técnicas dos motores de indução trifásicos são potência no eixo, velocidade, eficiência, fator de potência, rendimento, alimentação e outros. Tais informações são apresentadas na placa de identificação do motor.

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados em aplicações industriais devido à sua robustez, baixo custo e facilidade de manutenção, sendo responsáveis por cerca de 90% das máquinas elétricas industriais (Silva, 2013). O acionamento desses motores é um aspecto crucial para garantir seu desempenho eficiente e confiável.

O acionamento dos motores de indução trifásicos pode ser realizado através de diversos métodos, incluindo chaves de partidas eletromecânicas, tais como partida direta, partida estrela-triângulo e outras, partidas eletrônicas, como chave de partida suave, e o acionamento por inversor de frequência (Boldea & Nasar, 2006). Cada método tem suas vantagens e

desvantagens, e a escolha do método mais adequado depende das características específicas da aplicação industrial.

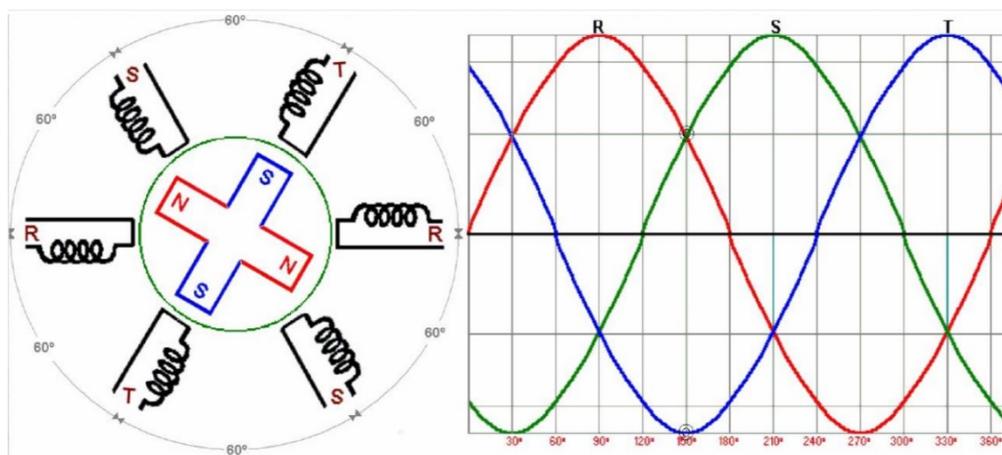
3.2 Princípio de funcionamento

Nesta seção, será discutido o princípio de funcionamento dos motores de indução trifásicos, destacando as interações eletromagnéticas que permitem seu funcionamento eficiente.

O princípio de funcionamento dos motores de indução trifásicos é fundamentado em conceitos de indução eletromagnética e rotação do campo magnético. Conforme descrito por Faraday (1831), a indução eletromagnética é o processo pelo qual uma corrente elétrica é induzida em um condutor pela variação do fluxo magnético que o atravessa. Isso é essencial para o funcionamento dos motores de indução, pois permite a conversão de energia elétrica em energia mecânica.

O motor de indução trifásico funciona com base no campo magnético rotativo gerado no estator, o qual é influenciado pela intensidade da corrente fluindo pelas bobinas do motor, como mostrado na figura 7. Para garantir um campo magnético girante uniforme, o estator é equipado com três bobinas posicionadas a 120° uma da outra, através das quais correntes senoidais e equilibradas devem circular. Essas correntes também devem estar defasadas entre si em 120° elétricos no tempo (Del toro, 1994).

Figura 7 - Representação de campo magnético rotativo



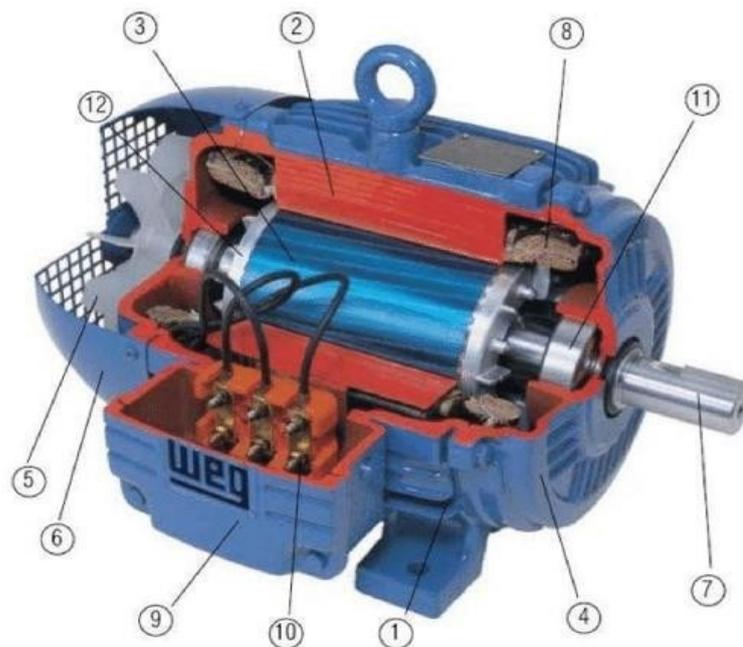
Fonte: Empresa WEG. (<https://www.weg.net>)

O campo magnético girante interage com o rotor do motor, produzindo nele correntes induzidas através da ação da força magnetomotriz do estator. As correntes rotóricas geram o

campo magnético rotórico, obedecendo a Lei de Faraday-Lenz (Faraday, 1831), resultando no movimento de rotação do rotor e produção de conjugado.

Além do funcionamento básico, é importante ressaltar que a eficiência dos motores de indução trifásicos é resultado de uma cuidadosa concepção do projeto, incluindo a escolha dos materiais, a geometria dos enrolamentos e a otimização das características magnéticas. Detalhes sobre essas considerações podem ser encontrados em obras especializadas sobre motores elétricos (Jones, 2018). A figura 8 mostra a vista em corte de um MIT e destaca suas partes principais, sendo: 1. Carcaça, 2. Núcleo de chapas-estator, 3. Núcleo de chapas-estator, 4. Tampa, 5. Ventilador, 6. Tampa defletora, 7. Eixo, 8. Enrolamentos trifásico, 9. Caixa de ligação, 10. Terminais, 11. Rolamentos e 12. Barras e anéis de de curto-circuito.

Figura 8 - vista em corte de um MIT e destaca suas partes principais



Fonte: Empresa WEG. (<https://www.weg.net>)

A rotação do campo magnético é um dos aspectos fundamentais desse princípio de funcionamento e é essencial para a geração do torque necessário para acionar máquinas e equipamentos industriais. Uma compreensão sólida desse processo é crucial para o design eficiente e a operação confiável de motores de indução trifásicos em uma variedade de aplicações. Além dos componentes mecânicos, outro item cuja compreensão é essencial para o estudo é a placa de identificação do motor, que está presente na parte externa da carcaça. Nessa placa, estão contidos todos os dados técnicos e informações que o usuário do motor necessita para realizar a instalação e colocá-lo em funcionamento de forma adequada.

Além disso, uma variedade de informações adicionais pode ser encontrada na placa de identificação do motor, mas a escolha dos dados específicos depende do fabricante e pode variar de um equipamento para outro. A seguir estão mostradas a placa de identificação de um MIT e a descrição de cada informação presente, conforme a figura 9.

As informações numeradas são: 1. Código do Motor, 2. Número de fases, 3. Tensão nominal do serviço, 4. Regime do serviço, 5. Rendimento, 6. Modelo de carcaça, 7. Grau de proteção, 8. Classe de isolamento, 9. Temperatura de classe de isolamento, 10. Frequência, 11. Potência, 12. Rotação nominal por minuto, 13. Corrente nominal de operação, 14. Fator de potência, 15. Temperatura ambiente, 16. Fator de serviço, 17. Altitude, 18. Massa, 19. Especificação do rolamento dianteiro e quantidade de graxa, 20. Especificação do rolamento traseiro e quantidade de graxa, 21. Tipo de graxa utilizada nos rolamentos e 22. Esquema de ligação para a tensão nominal.

Figura 9 - Placa de identificação de um motor de indução trifásico



Fonte: Empresa WEG. (<https://www.weg.net>)

Além das informações sobre a placa da identificação, os motores de indução trifásicos também apresentam suas principais características técnicas, que desempenham um papel crucial em sua operação eficiente em diversos cenários industriais. Essas características fornecem informações essenciais para o dimensionamento, operação e manutenção desses motores. Essas características incluem:

- Potência Nominal (PN): A potência nominal de um motor, geralmente medida em watts (W) ou quilowatts (kW), é um indicador chave de sua capacidade de produzir trabalho

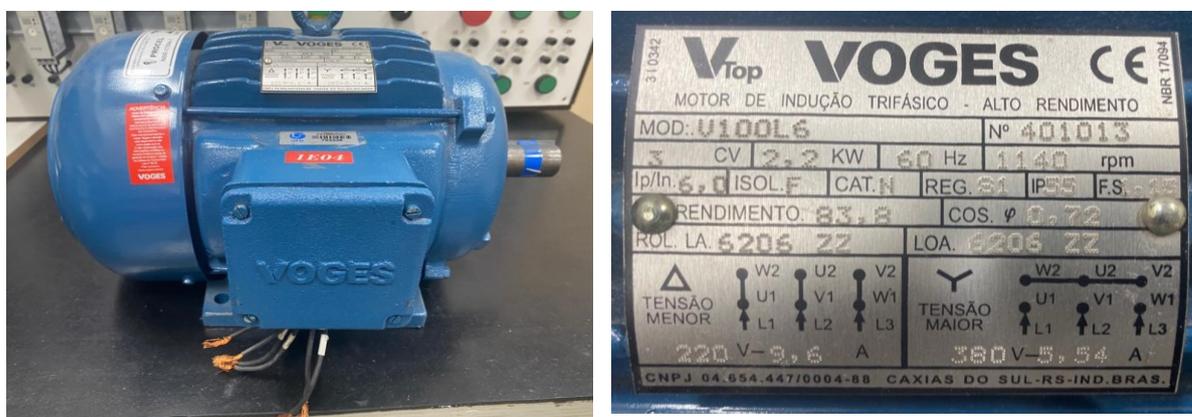
útil. A PN representa a potência máxima que o motor pode fornecer continuamente em condições normais de operação (Mamede, 2017). É um parâmetro crítico ao selecionar um motor adequado para uma aplicação específica.

- Tensão Nominal (VN): A tensão nominal, medida em volts (V), é a tensão para a qual o motor foi projetado para operar eficientemente. Garantir que o motor seja alimentado com a tensão correta é fundamental para evitar falhas prematuras e assegurar um desempenho consistente (Fitzgerald, 2002).
- Corrente Nominal (IN): A corrente nominal, medida em amperes (A), representa a corrente elétrica que o motor deve receber em operação normal. Essa informação é crucial para o dimensionamento dos sistemas de proteção e controle, garantindo uma operação segura e confiável.
- Eficiência (η): A eficiência de um motor, expressa como uma porcentagem, é um fator determinante na seleção de motores de alta qualidade. Ela indica quão bem o motor converte a energia elétrica em energia mecânica. Motores de alta eficiência são altamente desejáveis para reduzir custos operacionais e minimizar o impacto ambiental.

3.3 Ensaios do Motor de Indução Trifásico

Neste estudo, o motor empregado é o motor produzido pela empresa Voges, figura 10 (a), cuja placa de identificação está identificada na figura 10 (b). Os dados de placa também foram descritos na tabela 1.

Figura 10: Motor utilizado neste trabalho. (a) motor utilizado de marca voges; (b) dados de placa;



Fonte: Autor

Conforme mencionado anteriormente, motores de indução podem apresentar correntes de partida superiores a 10 vezes a corrente nominal. No caso desta placa, essa informação é representada pelo campo "IP/IN", com um valor de 6 vezes. Em seguida, um dado crucial para o dimensionamento adequado dos circuitos de instalação é o fator de potência, que é indicado como " $\cos \varphi$ " e possui um valor de 0,72.

Por consequente, o fator de serviço, indicado no campo "FS", representa a capacidade de sobrecarga contínua e deve ser multiplicado pela potência elétrica nominal. Além disso, os outros parâmetros importantes do motor, foi mostrado conforme a tabela 1. De outra forma, ele especifica uma potência adicional que pode ser acrescentada em situações específicas previamente definidas (FRANCHI, 2008).

Tabela 1 - Tabela de placa de identificação com os valores

Tabela da identificação da placa com os valores	
Modelo	V100L6
Potência (Cv)	3 Cv
Potência (Kw)	2,2 Kw
Frequência	60 Hz
Velocidade Nominal	1140 RPM
Ip/In	6
Rendimeto	83,8
Fator de Potência	0,72
Para a tensão de 220V	9,6 A
Para a tensão de 380V	5,54

Fonte: Autor

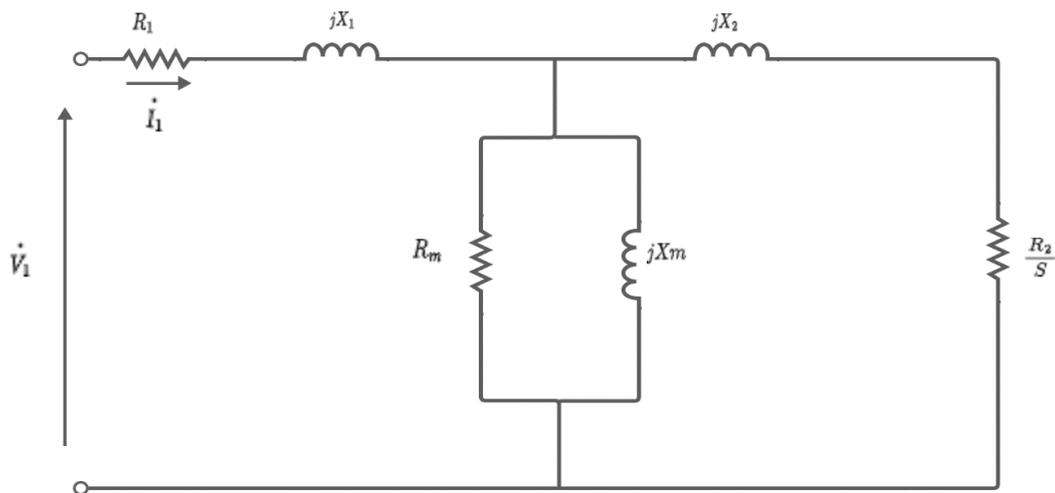
Além disso, uma variedade de informações adicionais pode ser encontrada na placa de identificação do motor, mas a escolha dos dados específicos depende do fabricante e pode variar de um equipamento para outro.

No âmbito dos Ensaio do Motor de Indução Trifásico, foram conduzidos diversos ensaios cruciais para avaliar o desempenho e as características operacionais do motor. Os ensaios realizados foram: Leitura direta do valor das resistências de fase; Ensaio em vazio; e Ensaio de rotor bloqueado

3.3.1 Leitura direta do valor das resistências de fase

Antes de realizar os ensaios em vazio e com rotor bloqueado é fundamental determinar a resistência do estator (R_s). A resistência do estator pode ser obtida de forma precisa utilizando técnicas apropriadas de medição, por exemplo, utilizando um ohmímetro de alta precisão. Essa medição é realizada com o motor desenergizado, garantindo que não haja corrente circulante nos enrolamentos do estator.

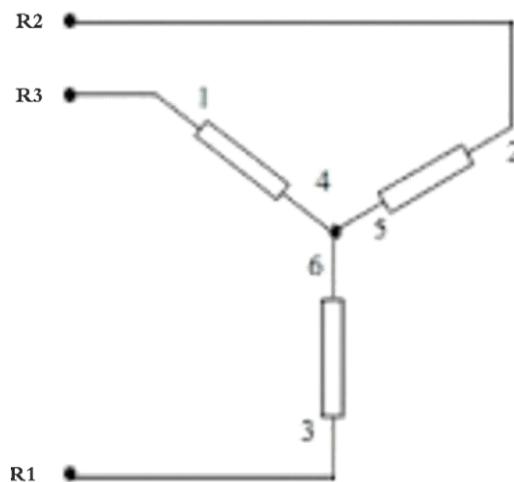
Figura 11 - Circuito Equivalente – Motor de indução trifásico



Fonte: Chapman, 2013. adaptado

No ensaio de laboratório para determinação das resistências do estator por fase de um motor, foram realizadas medições utilizando a técnica da ligação em estrela.

Figura 12 - Ligação estrela



Fonte: Chapman, 2013. adaptado

Através dessas medições, foram obtidos os seguintes valores das resistências, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Valores da Resistência

Fase A	Fase B	Fase C
1,77 Ω	1,75 Ω	1,78 Ω

Fonte: Autor

As resistências correspondem às resistências totais dos enrolamentos do estator, medidas de forma individual para cada fase do motor. Para obter as resistências do estator (R_s) utiliza equação 1.

$$R_s = \frac{R_A + R_B + R_C}{3} \quad (1)$$

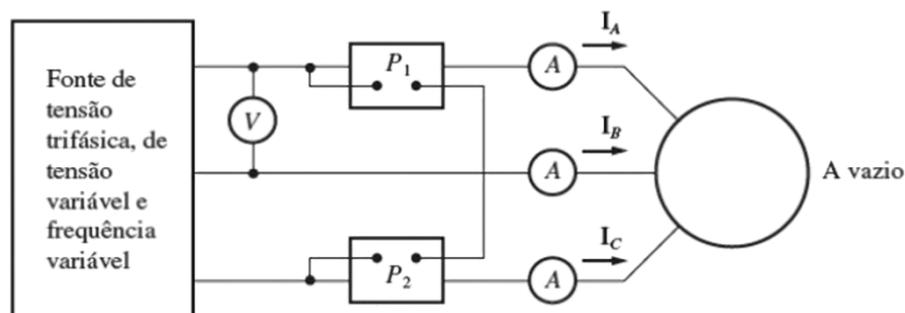
Onde: R_s =resistência do estator, R_A = resistência de fase A, R_B = resistência de fase B e R_C = resistência de fase C.

Após essa etapa de determinação da resistência do estator, são conduzidos os ensaios em vazio e com rotor bloqueado para caracterização completa das propriedades elétricas do motor e obtenção de informações adicionais, como a resistência do rotor e a corrente da excitação, essenciais para a análise e modelagem do motor assíncrono.

3.3.2 Ensaio a vazio

O ensaio a vazio é conduzido para coletar informações sobre a corrente de excitação e as perdas sem carga. Normalmente, esse ensaio é realizado com a frequência e tensões nominais aplicadas de maneira equilibrada no estator. (Umans, 2014). Para a realização do ensaio, são necessários dois wattímetros, um voltímetro e três amperímetros, que são conectados a um motor de indução. A configuração do circuito é apresentada na figura 13.

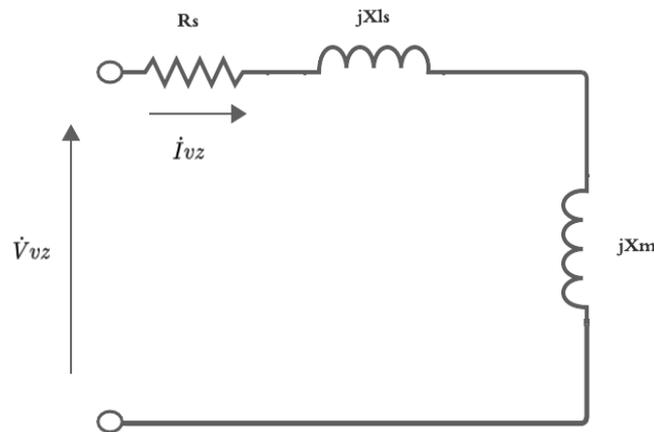
Figura 13 - Esquema de montagem do ensaio a vazio



Fonte: Chapman, 2013

Inicialmente, para o ensaio a vazio, a tensão deve ser ajustada até seu valor nominal que é 380V. Posteriormente, os parâmetros relevantes são coletados para esse valor de tensão. É importante destacar que toda a potência convertida durante o ensaio é dissipada nas perdas mecânicas, e o escorregamento é bastante reduzido nesse processo.

Figura 14 – Circuito equivalente do ensaio a vazio



Fonte: Autor

Os parâmetros foram obtidos, como mostrado na tabela 3:

Tabela 3 – Resultados obtidos no ensaio a vazio

Corrente na fase A	Corrente na fase B	Corrente na Fase C	Corrente Nominal	Potência
4,26 A	3,60 A	3,20 A	5,5 A	243 W

Fonte: Autor

A partir dos dados obtidos durante o ensaio, todos os parâmetros foram determinados usando as equações subsequentes.

No ensaio a vazio de motores de indução trifásicos, ao aplicar uma tensão trifásica sem carga mecânica, observamos a corrente a vazio (I_{vazio}), que representa a corrente necessária para manter o fluxo magnético no núcleo sem carga. com a equação (2), possibilita a obtenção dessa corrente. Essa corrente, por sua vez, está relacionada à tensão a vazio (V_{vazio}), que é a tensão aplicada durante esse estágio. É possível calcular este parâmetro através da equação (3).

$$|\dot{I}_{vazio}| = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (2)$$

$$|\dot{V}_{vazio}| = \frac{380}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Essa relação entre corrente a vazio e tensão a vazio é crucial para a determinação das perdas no cobre (P_{cu}), resultantes da resistência dos enrolamentos do estator e do rotor. As perdas no cobre, por sua vez, contribuem para a dissipação de potência no sistema, afetando diretamente o desempenho do motor. A equação (4), viabiliza a determinação desse parâmetro.

$$P_{cu} = 3 * R_s * |I_{vazio}|^2 \quad (4)$$

Além disso, as perdas rotacionais (P_{rot}), que englobam fatores como atrito e ventilação, podem ser quantificadas durante o ensaio a vazio. Essas perdas adicionais têm impacto no consumo total de potência, o que é um aspecto crítico para a eficiência operacional do motor. Esse parâmetro pode ser obtido com a equação (5).

$$P_{rot} = P_{total} - P_{cu} \quad (5)$$

A impedância a vazio (Z_{vazio}) do motor, composta por resistência (R) e reatância (X), é derivada das características observadas durante o ensaio a vazio. A resistência a vazio (R_{vazio}), relacionada às perdas no cobre, influencia diretamente a parte resistiva da impedância, enquanto a reatância a vazio (X_{vazio}) é associada às perdas rotacionais. Esses parâmetros podem-se determinar por meio das equações (6), (7) e (8).

$$|Z_{vazio}| = \frac{|\dot{V}_{vazio}|}{|I_{vazio}|} \quad (6)$$

$$R_{vazio} = \frac{P_{vazio}}{3 * |I_{vazio}|^2} \quad (7)$$

$$|X_{vazio}| = \sqrt{R_{vazio}^2 + Z_{vazio}^2} \quad (8)$$

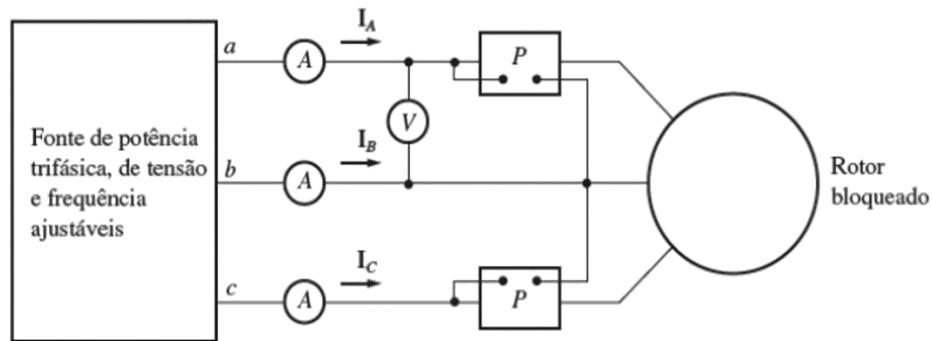
3.3.3 Ensaio de rotor bloqueado

O ensaio do rotor bloqueado em um motor de indução fornece dados sobre a impedância de dispersão, um parâmetro importante. Durante este ensaio, o rotor é mantido estático, impedido de girar, enquanto tensões equilibradas são aplicadas ao estator (UMANS, 2014).

Inicialmente, aplica-se uma tensão ao motor de forma a atingir a corrente nominal medida. Em seguida, registram-se os valores de corrente e potência resultantes. o respectivo ensaio é usado para determinar a resistência total do circuito do motor. A Figura 27 apresenta o esquema desse procedimento.

A norma da norma IEEE 112 propõe que, no ensaio de bloqueio do rotor, a frequência utilizada deve corresponder a 25% da frequência nominal. A reatância total de dispersão na frequência nominal pode ser determinada a partir dos resultados desse ensaio, considerando que a reatância seja diretamente proporcional à frequência (UMANS, 2014).

Figura 15 - Esquema de montagem do ensaio de rotor bloqueado

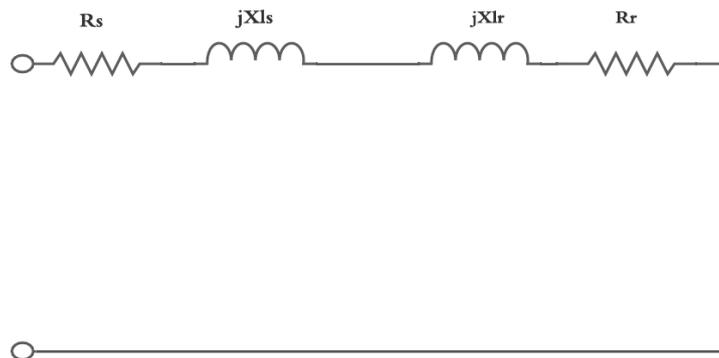


Fonte: Chapman, 2013

Durante o ensaio de rotor bloqueado com uma ligação em estrela e usando a tensão nominal de 380V, realizamos os seguintes procedimentos:

Primeiro, garantimos que o rotor do motor estava bloqueado, impedindo qualquer movimento. Em seguida, a tensão de 380V é aplicada na ligação em estrela do motor para estabelecer as condições do ensaio. E a seguir medir a corrente que flui no circuito durante o ensaio, o que nos forneceu a corrente nominal do motor.

Figura 16 - Circuito equivalente do ensaio de rotor bloqueado



Fonte: Autor

Também fazer a medição da tensão de linha (V_{cc}) aplicada durante o ensaio. Para calcular a potência, multiplicamos a tensão de linha (V_{cc}) pela corrente nominal ($I_{nominal}$), resultando na potência do motor durante o ensaio. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de rotor bloqueado

Corrente Nominal	Tensão de Linha	Potência
5,54 A	81 V	385 W

Fonte: Autor

O ensaio de rotor bloqueado em um motor de indução trifásico é uma prática fundamental para analisar o comportamento do equipamento em condições específicas. Ao explorar os diversos parâmetros associados a esse ensaio, é possível obter uma visão mais aprofundada do desempenho do motor em situações críticas.

A corrente de rotor bloqueado (I_{bl}) é um dos elementos centrais nesse ensaio. Ela representa a corrente que flui no rotor do motor quando este se encontra impedido de girar, permitindo avaliar a resposta do sistema em condições de carga máxima. Durante o ensaio, o motor é mantido mecanicamente impedido de girar. Isso significa que não há movimento no rotor, ou seja, a corrente de rotor bloqueado é igual à corrente nominal do motor.

Essa corrente está intrinsecamente relacionada à tensão de rotor bloqueado (V_{bl}), que expressa a tensão aplicada ao rotor quando está parado. A interdependência entre esses dois parâmetros revela aspectos cruciais sobre a capacidade de operação do motor em situações desafiantes. As equações (9) e (10), possibilita a obtenção desses parâmetros.

$$|\dot{I}_{bl}| = I_n \quad (9)$$

$$|\dot{V}_{bl}| = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

A impedância de rotor bloqueado (Z_{bl}), por sua vez, é uma medida da oposição que o rotor oferece à passagem da corrente, envolvendo tanto a resistência quanto a reatância. A resistência de rotor bloqueado (R_{bl}) é o componente que representa as perdas por efeito joule no rotor enquanto a reatância de dispersão representa as linhas de fluxo magnético que não contribuem para a produção da força magnetomotriz do rotor e por conseguinte para a produção de conjugado. Os valores das reatâncias de dispersão também são condicionados pela categoria do motor. Por outro lado, a reatância de magnetização (X_m) representa as linhas de fluxo magnético que enlaçam o rotor, contribuindo de forma efetiva para a produção de conjugado. A obtenção desses parâmetros é realizada por meio das equações subsequentes (11) – (17).

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3 * |\dot{I}_{bl}|^2} \quad (11)$$

$$|\dot{Z}_{bl}| = \frac{|\dot{V}_{bl}|}{|\dot{I}_{bl}|} \quad (12)$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{bl}^2} \quad (13)$$

$$R_r = R_{bl} - R_s \quad (14)$$

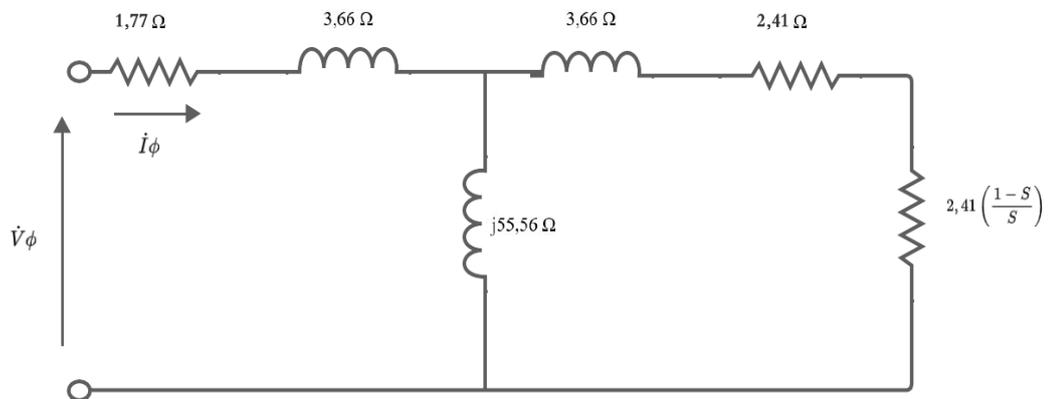
$$X_{ls} + X_{lr} = X_{lb} \quad (15)$$

$$X_{ls} = X_{lb} - X_{lr} \quad (16)$$

$$X_m = X_{vazio} - X_{ls} \quad (17)$$

Esses elementos formam o circuito equivalente do motor, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 - Circuito equivalente com todos os parâmetros



Fonte: Autor

Todos os resultados dos parâmetros calculados, utilizando as equações mencionadas, foram identificados e estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos dos parâmetros

Todos os parâmetros calculados	
Número das equações e parâmetros	Resultados obtidas
1. Resistência do estator	1,76 Ω
2. Corrente a vazio	3,69 A

3. Tensão a vazio	219,38 V
4. Perdas no cobre	72,18 W
5. Perdas rotacionais	170,82 W
6. Impedância a vazio	59,45 Ω
7. Resistência a vazio	5,9488 Ω
8. Reatância a vazio	59,15 Ω
9. Corrente de rotor bloqueado	5,54 A
10. Tensão de rotor bloqueado	46,76 V
11. Resistência de rotor bloqueado	4,18 Ω
12. Impedância de rotor bloqueado	8,44 Ω
13. Reatância de rotor bloqueado	7,33 Ω
14. Resistência do rotor	2,41 Ω
15. Reatância da linha	7,33 Ω
16. Reatância da sequência positiva	3,665 Ω
17. Reatância de magnetização	55,449 Ω

Fonte: Autor

Uma curva de conjugado é levantada a partir dos dados do circuito equivalente, e informações do motor como conjugado máximo ($C_{m\acute{a}x}$), escorregamento máximo ($s_{m\acute{a}x}$), e o conjugado nominal (C_n) são calculados. O conjugado de plena carga pode ser obtido pela equação 21.

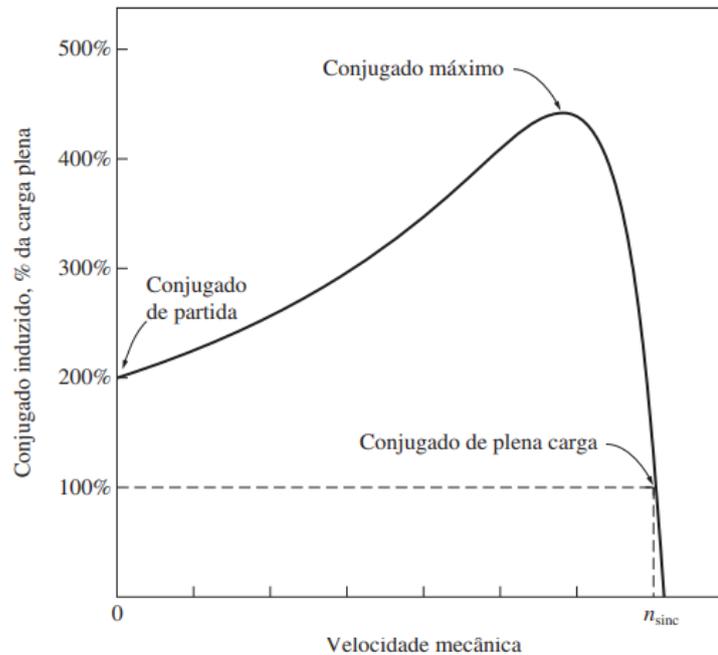
$$s_{m\acute{a}x} = \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (18)$$

$$V_{th} = |\dot{V}_{vazio}| * \frac{X_m}{\sqrt{R_s^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}} \quad (19)$$

$$R_{th} = R_1 * \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right) \quad (20)$$

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{3 * V_{th}^2}{2 * W_s * \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \right]} \quad (21)$$

Figura 18 - Curva de Conjugado x Velocidade



Fonte: (Chapman, 2002)

$$C_n = \frac{P_n}{W_n} \quad (21)$$

O motor de indução atinge um conjugado igual a zero quando alcança a velocidade síncrona caso sejam mantidas tensão e frequência nominal da máquina. Conforme a carga no eixo aumenta, a rotação do motor diminui gradualmente até atingir um ponto onde o torque atinge seu valor máximo. Se o torque da carga continuar a aumentar, a rotação do eixo diminuirá bruscamente, levando o motor para a condição de rotor bloqueado. A figura 18 representa a variação do conjugado em relação com a sua velocidade.

3.4 Considerações Finais

Resumindo, os ensaios de leitura direta dos valores da resistência do estator, ensaio vazio e ensaio de rotor bloqueado desempenham papéis cruciais na avaliação e no entendimento abrangente do desempenho de um motor de indução trifásico.

A medição direta da resistência do estator proporciona uma avaliação imediata da integridade do sistema elétrico, possibilitando a detecção antecipada de potenciais defeitos nos enrolamentos. O ensaio vazio proporciona informações sobre as perdas e eficiência em situações de carga mínima, enquanto o ensaio de rotor bloqueado destaca a resistência do motor a condições adversas. Estes procedimentos contribuem para a análise de regime permanente do motor.

4. PARTIDAS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

No presente capítulo, serão explorados os comportamentos das partidas direta, estrela triângulo e soft starter, e do acionamento via inversor. A análise abrangerá resultados práticos, simulações e estudos teóricos, proporcionando uma compreensão aprofundada das características destas técnicas de acionamentos. Serão examinadas as vantagens, desvantagens e aplicações específicas desses métodos, consolidando um conhecimento abrangente sobre as diferentes abordagens no acionamento de equipamentos industriais.

As simulações são elaboradas a partir de modelos e oferecem flexibilidade na definição dos parâmetros de entrada pelo usuário, possibilitando a adaptação de cada simulação conforme as exigências de cada sistema. Através das simulações, é possível observar o comportamento dos motores de indução trifásico em cada método de partida, avaliando fatores como corrente de partida, torque inicial, eficiência e estabilidade do sistema.

A análise dos resultados obtidos nas simulações proporciona entendimentos para a escolha e implementação eficaz dos métodos de partida em aplicações práticas. Além disso, essa abordagem oferece uma visão mais clara e ampla das vantagens e limitações de cada método, contribuindo para a otimização do funcionamento dos motores de indução trifásico e promovendo a eficiência energética e a durabilidade do sistema.

4.1 Chave de Partida Direta

Nesta seção, será apresentado em detalhes o método de partida direta para motores de indução trifásicos, através das análises práticas, e destacando seu funcionamento, aplicações e considerações relevantes.

4.1.1 Descrição do método de partida direta

A chave de partida direta é um dos métodos mais simples de acionar um motor, não necessitando de dispositivos complexos para ativá-la (Smith, 2020). O dispositivo, composto por contadores, disjuntores motores e fusíveis, permite acionar o motor, fornecendo-lhe potência elétrica para suprir conjugado e corrente de partida (Mamede, 2017).

A aplicação da partida direta de motores nas indústrias desempenha um papel crucial ao garantir o máximo desempenho dos motores, reduzir custos operacionais e simplificar tanto a

implementação quanto a manutenção, atendendo assim às demandas de uma variedade de operações industriais.

As principais aplicações de partida direta entre elas:

- Motores de baixa potência: são aqueles com potência nominal inferior a 7,5/10 cv, e são normalmente recomendados para serem iniciados diretamente, pois requerem uma corrente de partida mais baixa, minimizando assim o impacto na rede elétrica (Silva e Pereira, 2013, p. 237).
- Motores que não exigem alto torque da partida: podem ser acionados diretamente, dispensando a utilização de um dispositivo para reduzir o torque de partida (Oliveira, 2016, p. 227).

Também há algumas aplicações específicas da partida direta, entre elas:

- Em motores utilizados para bombear líquidos: a partida direta é frequentemente indicada devido à sua carga leve e operação intermitente (Silva e Pereira, 2013, p. 237).
- Os motores que movem ventiladores, como os de exaustores e de teto: Normalmente utilizam partidas diretas, pois são cargas fracionárias (Oliveira, 2016, p. 227).
- motores de máquinas e equipamentos de potência fracionária: são motores monofásicos utilizados em aplicações domésticas em redes rurais. (Pereira, 2015, p. 225).

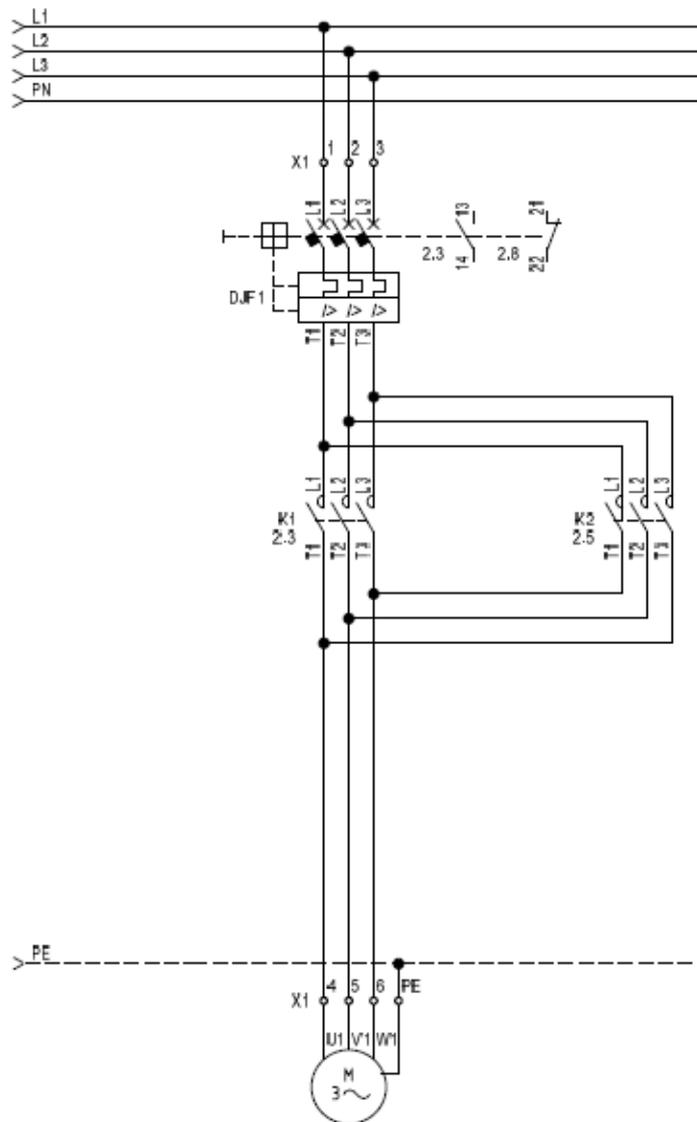
As figuras 19 e 20 apresentam os circuitos de potência e de comando de uma chave de partida direta com reversão de velocidade, respectivamente. O método de partida direta é adequado para aplicações em que não é necessária uma aceleração suave ou um controle preciso da velocidade. É comumente usada em motores de baixa potência e de potência fracionária encontrados em sistemas de bombas, ventiladores e transportadores (Jones, 2018).

No entanto, para garantir o sucesso ao optar pela partida direta, é fundamental atender a certas condições. Uma delas é assegurar que a rede elétrica tenha uma capacidade de fornecimento de corrente suficientemente alta, de modo que a corrente de partida do motor não seja um fator relevante. Deve-se garantir que a rede de suprimento não alimente cargas sensíveis a afundamentos de tensão causados pela partida dos motores e que a carga não seja de grande inércia pois poderia haver danos aos mancais e eixo do motor.

Durante a partida direta, os contatos do motor são fechados, permitindo que a tensão total seja aplicada diretamente aos enrolamentos do estator. Isso resulta em uma corrente de

partida elevada, que pode causar afundamentos de tensão e estresse mecânico no sistema (Franchi, 2008).

Figura 19 – Circuito de potência da chave de partida direta com reversão



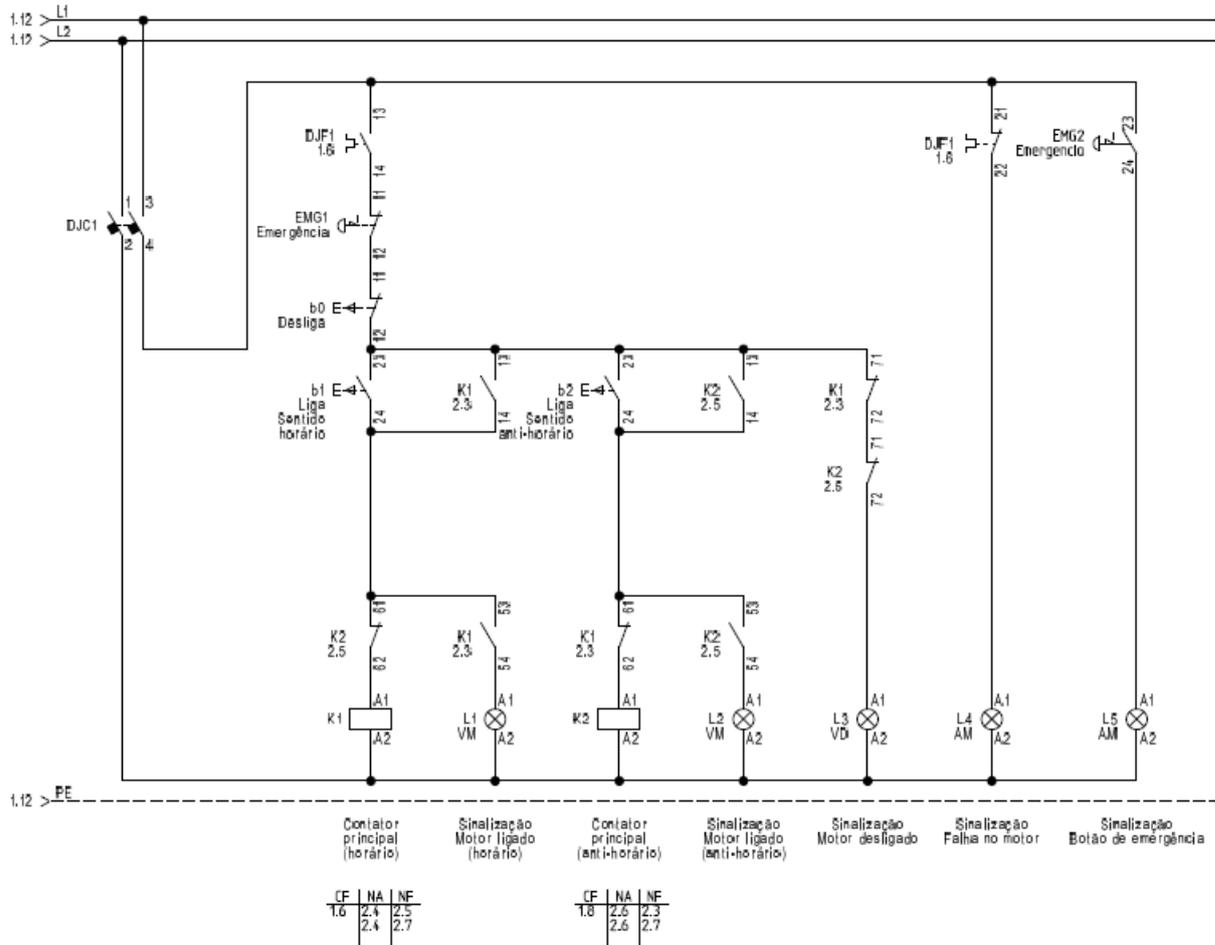
Fonte: Autor

A aplicação da partida direta nas indústrias também possui algumas restrições a serem seguidas, entre elas:

- É essencial notar que a corrente de partida em um motor iniciado diretamente pode ser até sete vezes maior do que a corrente nominal do motor (Silva e Pereira, 2013).
- Motores com cargas pesadas ou operação contínua podem não ser adequados para a partida direta, necessitando de outros métodos de partida (Oliveira, 2016).

O circuito de potência é composto pelos dispositivos de manobra e de proteção. O contator é o dispositivo responsável pela a alimentação do motor. O disjuntor motor é utilizado como dispositivo de proteção contra curto-circuito e sobrecarga. Os fusíveis são dispositivos de segurança contra curtos-circuitos, sendo que estes devem ser coordenados com aqueles.

Figura 20 – Circuito de comando da chave de partida direta com reversão



Fonte: Autor

O circuito de comando é composto por botoeiras, contatos auxiliares dos contadores, leds, circuitos auxiliares, etc. É uma chave bastante simples, robusta e de baixo custo. No entanto, há restrições quanto à dimensão do motor e à rede de suprimento à qual o motor será alimentado.

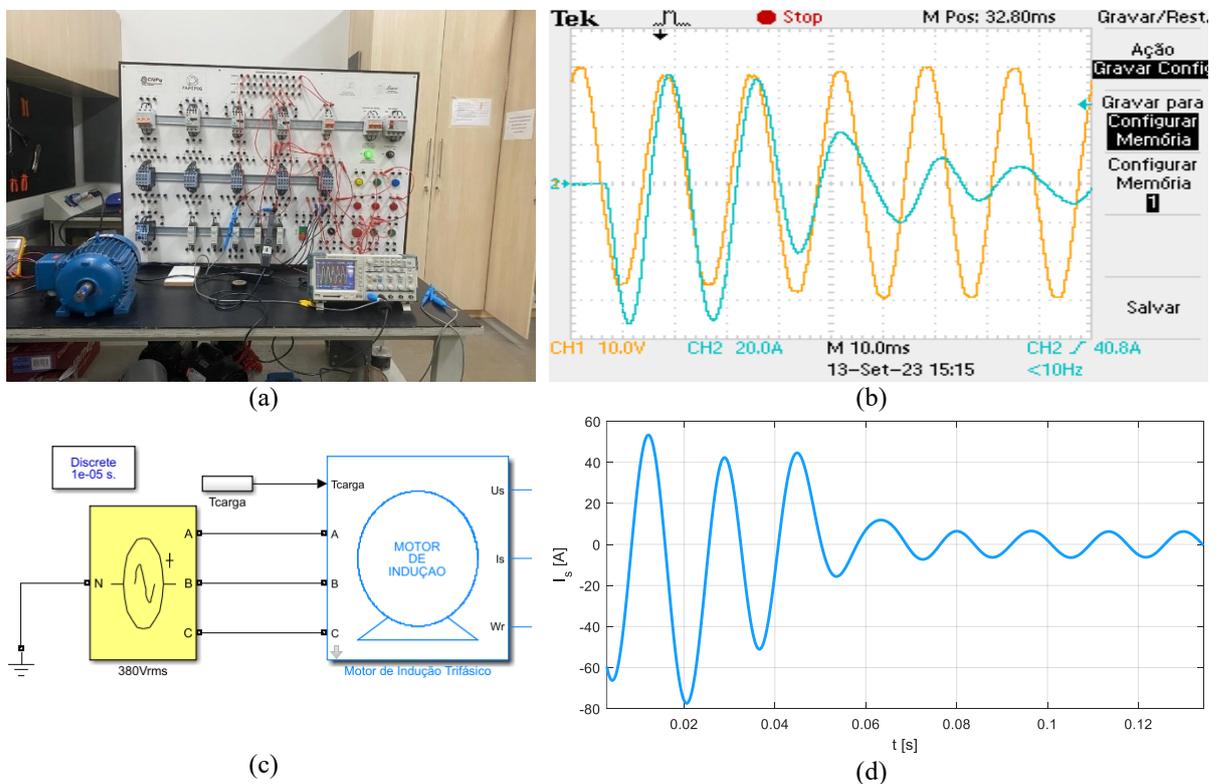
4.1.2 Análise prática da chave de partida direta

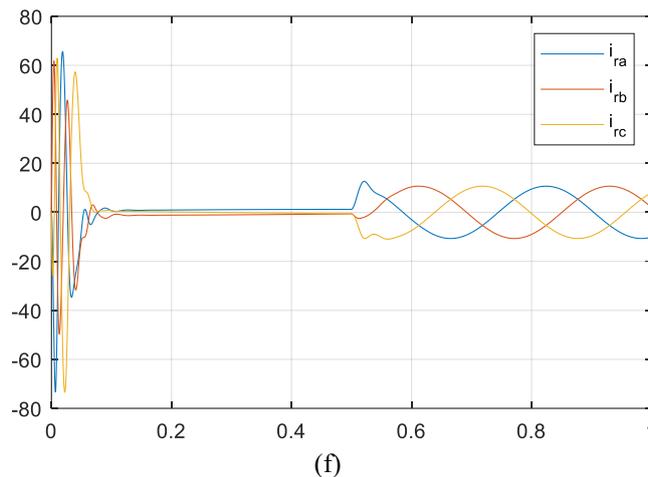
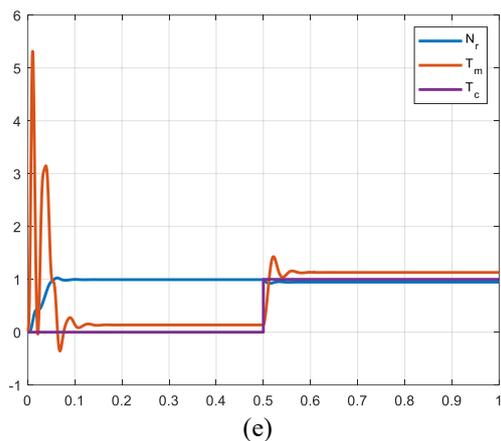
A aplicação da chave de partida direta está ilustrada na figura 21. A figura 21 (a) mostra a bancada de acionamentos onde foram realizadas as análises práticas, e a figura 21 (b)

apresenta a tensão e a corrente durante a partida. Pode-se perceber que a corrente de partida é cerca de 58 A. Como a corrente nominal deste motor é 9,6 A, então a corrente de partida é cerca de 6 vezes a corrente nominal deste motor.

A figura 21 (c) mostra a estrutura da simulação dinâmica do motor na ferramenta Matlab/Simulink®. E os gráficos das figuras 21 (d)-(f) apresentam os resultados de simulação. Pode-se verificar que a corrente de partida, figura 21 (d), apresenta perfil muito semelhante ao da corrente real. A figura 21 (e) mostra a velocidade, e as curvas de conjugado do motor e de carga, todas em pu. É possível verificar o impacto da partida na velocidade e no conjugado motor. A entrada do conjugado de carga também produz perturbações no conjugado motor e na velocidade, mas em menor grau. Destaque especial deve ser dada à figura 21 (f), corrente do rotor. Pode-se observar que a frequência da corrente do rotor segue o escorregamento do motor. Ou seja, esta simulação foi trabalhada no referencial da fase do motor, onde cada grandeza está no seu próprio referencial. O estudo detalhado deste modelo pode ser encontrado no trabalho (Resende, 1999).

Figura 21 – Chave de partida direta. (a) painel de acionamentos; (b) resultados experimentais; (c) simulação digital; (d) corrente do estator; (e) velocidade e conjugado motor e conjugado de carga em pu; (f) corrente do rotor no referencial rotórico.





Fonte: autor

4.1.3 Vantagens e desvantagens da partida direta:

De acordo com (Franchi, 2008) as vantagens da partida direta são:

- Facilidade de instalação;
- Custo reduzido;
- Dimensão reduzida da chave de partida;
- Sem limites para a quantidade de partidas;
- Possibilita a aplicação do torque máximo do motor em todos os instantes de operação;

As desvantagens desta chave de partida são:

- Alta corrente de partida;
- Afundamentos de tensão;
- Altos picos de conjugado, o que pode causar estresse mecânico no sistema;
- Aumento da manutenção do motor;
- Superdimensionamento de cabos e proteção;

4.2 Chave de Partida Estrela-Triângulo

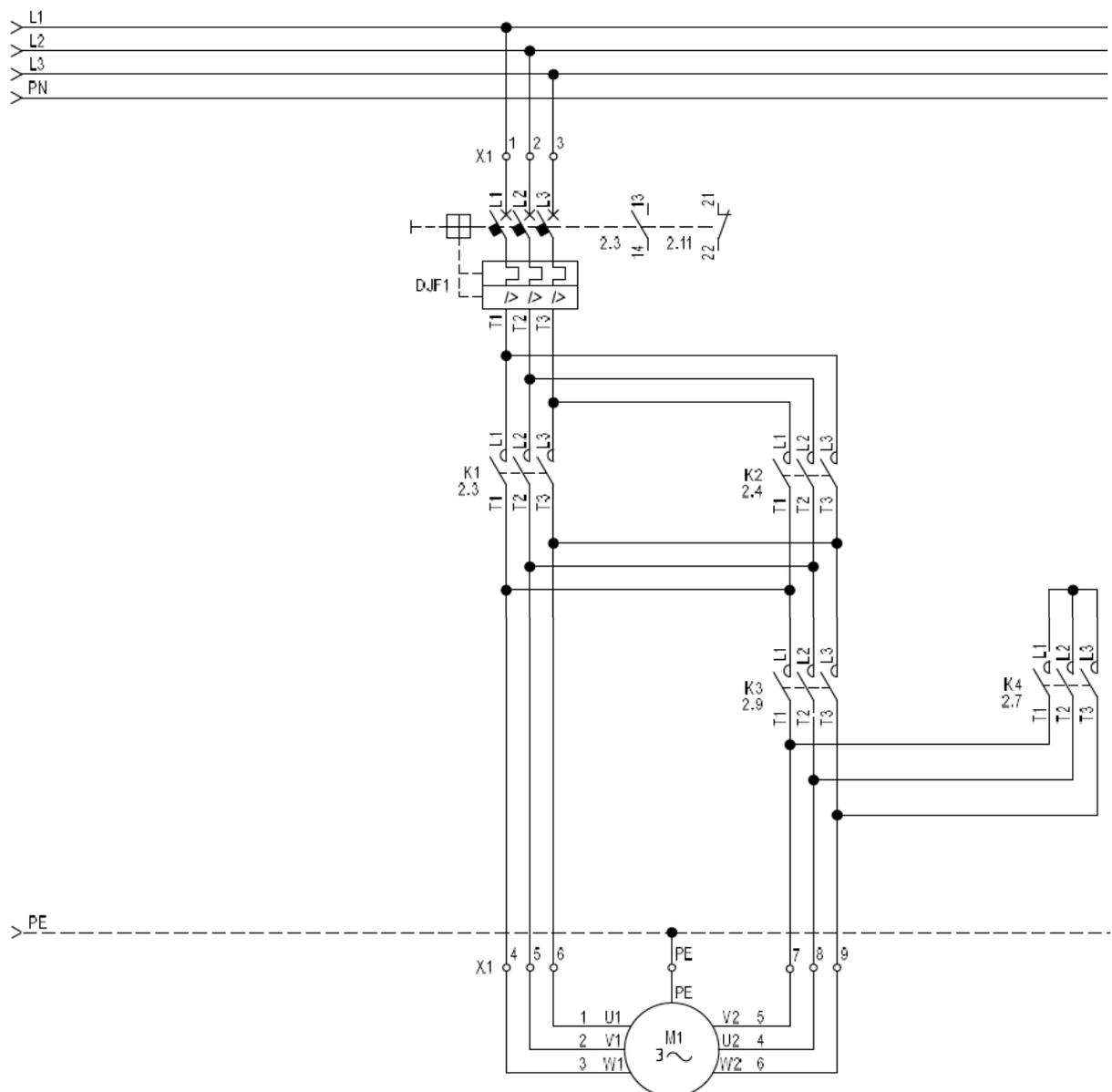
Nesta seção é apresentada a chave de partida estrela-triângulo para motores de indução trifásicos, por meio de análise teórica, análises práticas e simulações enfatizando seu funcionamento, aplicações e considerações pertinentes.

4.2.1 Descrição do método de partida estrela-triângulo

A chave de partida estrela-triângulo é ajustada para reduzir a corrente de partida e minimizar o estresse inicial do motor, contribuindo para a proteção do sistema elétrico e a preservação do motor (Chapman, 2005).

As figuras 22 e 23 mostram os circuitos de potência e de comando em uma partida estrela-triângulo com reversão de velocidade, respectivamente. No esquema da figura 22 são apresentados os componentes de potência da chave, disjuntor motor e contadores.

Figura 22 – Chave de partida estrela-triângulo



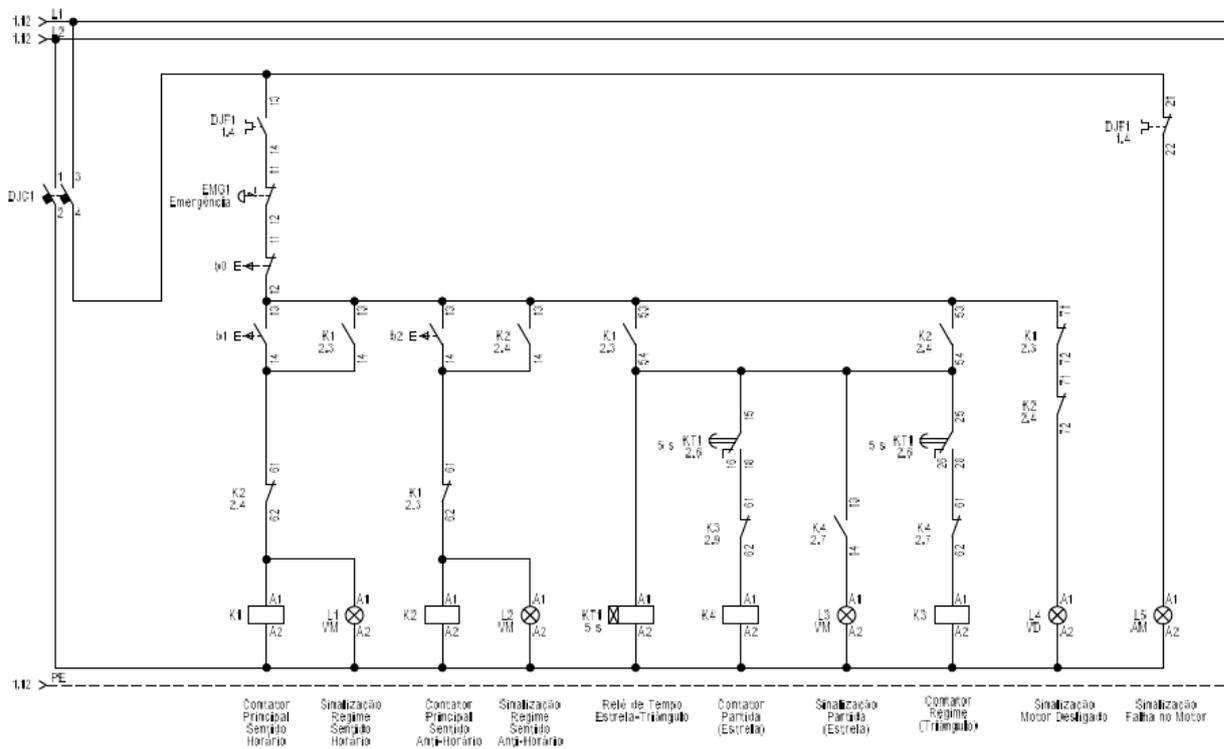
Fonte: Autor

Os contadores K1 e K2 são os responsáveis por alimentar o motor, sendo que a utilização de cada um deles depende do sentido de giro a ser aplicado ao motor. A escolha do sentido de

giro é realizada pelo operador via botoeira. O contator K4 é responsável o fechamento do motor em estrela, o qual se dá somente durante a partida do motor. O contator K3 é responsável pelo fechamento do motor em triângulo, e atuará durante o regime permanente da operação da chave.

O circuito de comando da chave de partida estrela-triângulo é contatos auxiliares, botoeiras do tipo retorno por mola, leds sinalizadores, circuitos auxiliares e um relé temporizador estrela-triângulo.

Figura 23 – Chave de partida estrela-triângulo

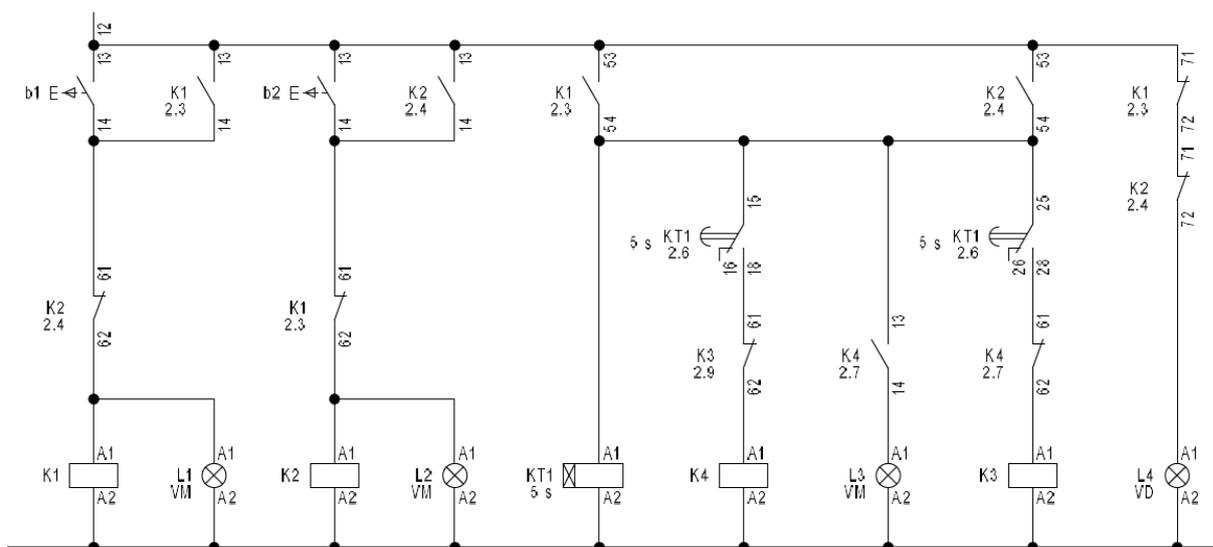


Fonte: Autor.

A figura 24 apresenta o diagrama de comando de forma ampliada, para que seja possível identificar cada elemento do circuito de comando. Destaque especial é dado ao dispositivo relé temporizador estrela-triângulo, KT1. A principal finalidade desse relé é coordenar o acionamento sequencial de cada estágio do motor, ajustando-se ao momento adequado de partida, seja em condições transitórias ou em regime permanente. Adicionalmente, o dispositivo incorpora um intervalo de tempo inerte durante a transição entre regimes, prevenindo potenciais curtos-circuitos entre as fases do motor. A figura 25 mostra os esquemas de fechamento do motor para estrela, figura 25 (a) e triângulo, figura 25 (b). Um detalhe bastante importante sobre esta chave é que a tensão de alimentação disponível deve ser a tensão para alimentação do motor em triângulo.

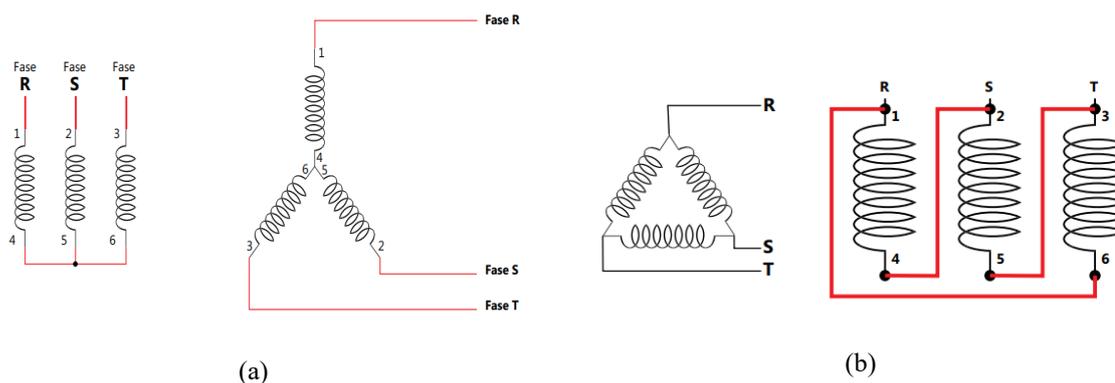
Um dos principais benefícios desse método de partida é a redução da corrente de partida, promovendo assim uma operação mais estável e confiável do sistema elétrico. Isso, por sua vez, minimiza a probabilidade de quedas de tensão e interrupções. É importante ressaltar que o custo desta redução da corrente de partida implica em perda de conjugado de partida. Isso significa que esta abordagem não é apropriada para aplicações que exigem partidas sob carga nominal ou em situações que envolvam cargas de grande inércia.

Figura 24 – Chave de partida estrela-triângulo



Fonte: Autor

Figura 25 – (a) Fechamento em estrela; (b) Fechamento em triângulo



Fonte: Umans, 2014

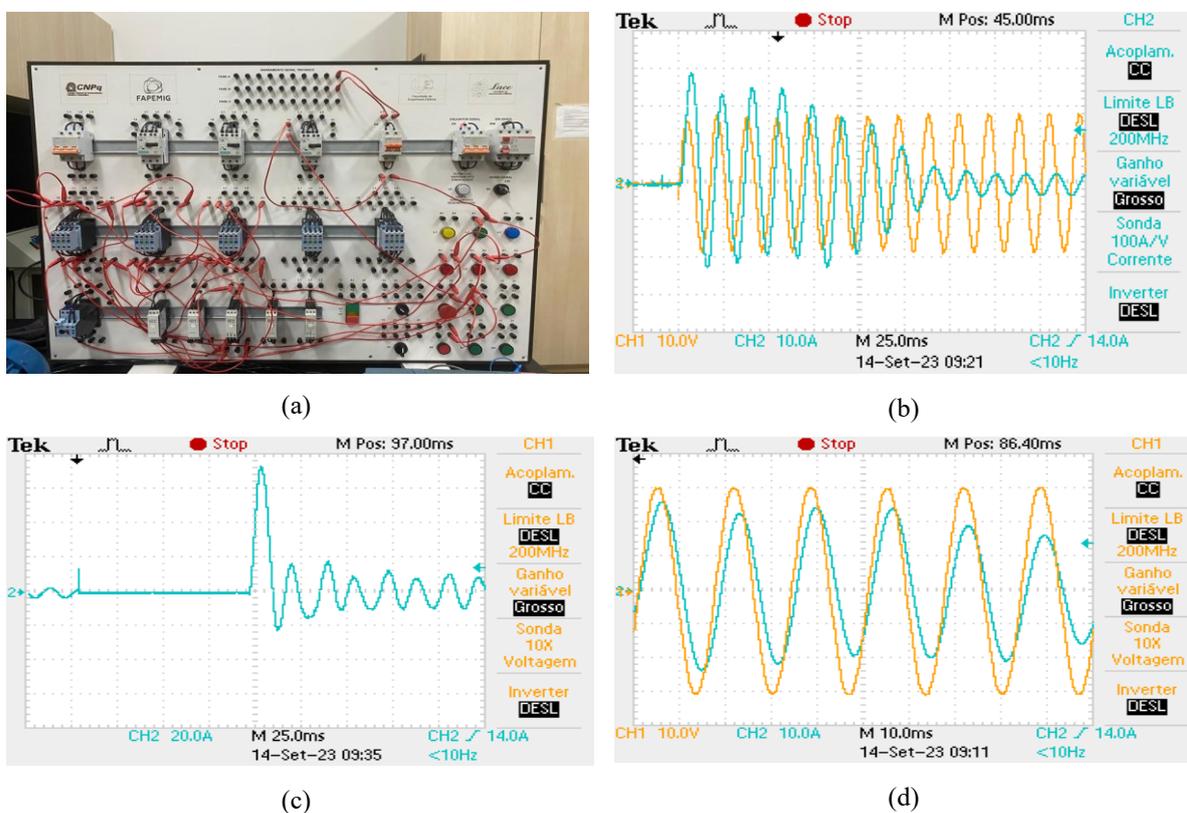
4.2.2 Análise prática de partida de estrela-triângulo

A chave de partida estrela-triângulo foi montada e testada em laboratório, conforme apresentado na figura 26 (a). As figuras 26 (b)-(d) apresentam momentos específicos da dinâmica da chave de partida estrela-triângulo. A figura 26 (b) mostra a tensão nos terminais e

a corrente de linha do motor durante a partida. Pode-se perceber que o valor de pico é 180 V, 127 V_{rms}, e que a corrente de partida chega a 40 A_{pp}, ou 20 A_p. Este valor representa 1/3 do valor da corrente de partida para a chave de partida direta. A figura 26 (c) mostra a corrente de linha do motor durante a transição. Pode-se perceber que a corrente atinge o valor da corrente de partida. Isto mostra que mesmo neste caso, o motor e o sistema de alimentação não estão livres do “in-rush” de corrente com a adoção desta chave de partida. No entanto, o período de transição é bem menor, cerca de 10 ms, como está apresentado na figura 26 (d).

Figura 26 – Montagem prática da partida estrela-triângulo; (a) montagem feita na bancada do laboratório; (b)

Curva de tensão e corrente durante a partida do motor em estrela; (c) Curva da corrente de linha do motor durante a transição de estrela para triângulo; (d) Curvas de corrente e tensão logo após a transição de estrela para triângulo.

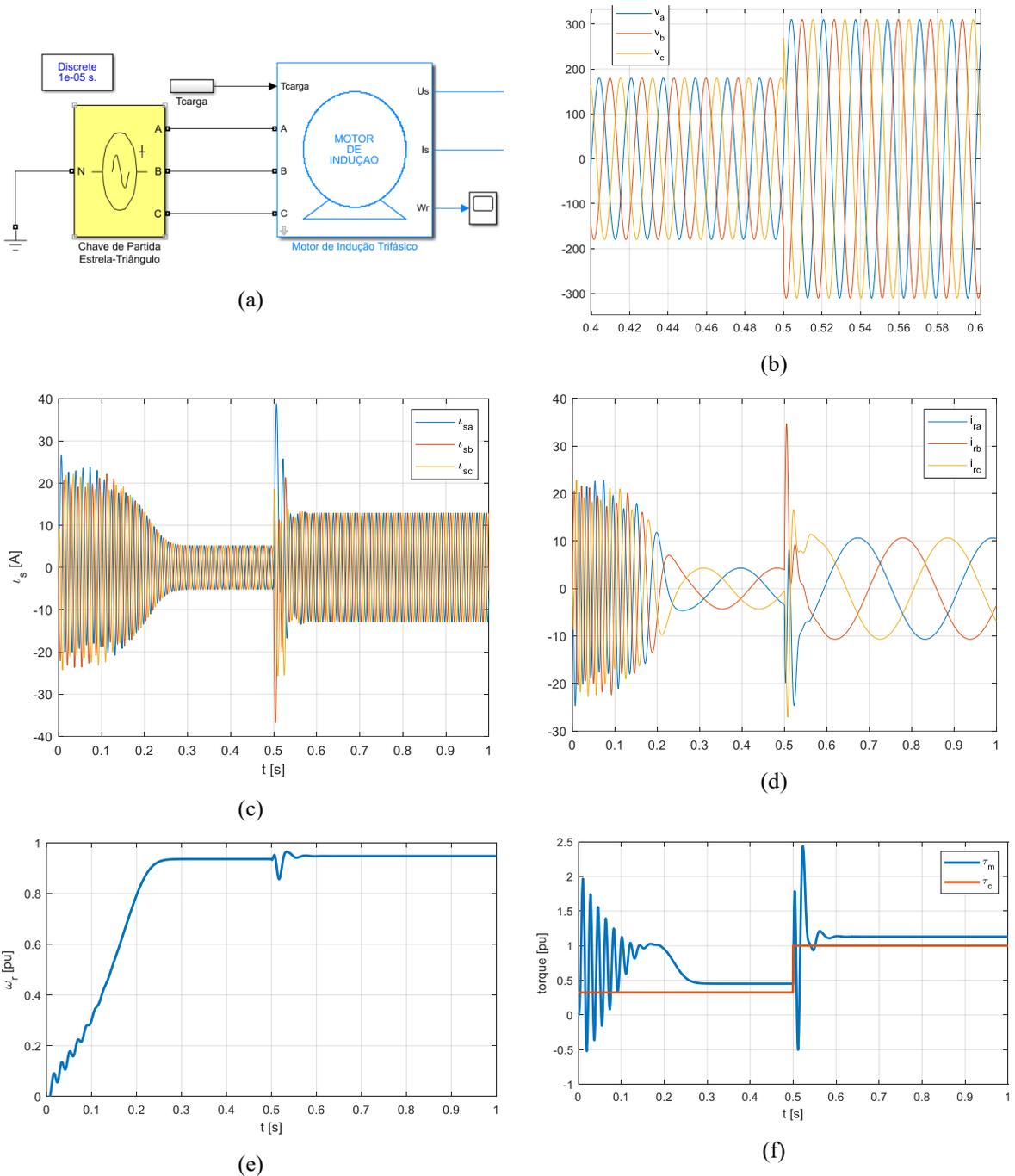


Fonte: Autor

A figura 27 (a) mostra o modelo simulado da chave de partida estrela-triângulo. Alguns resultados de simulação são apresentados nas figuras 27 (b)-(f). Na figura 27 (b) apresenta o degrau de tensão aplicado ao motor no instante da comutação do fechamento estrela para triângulo, sendo que o efeito desta comutação na corrente é apresentado na figura 27 (c). Observa-se que o pico de corrente reduz para um terço do valor corresponde na partida direta, 20 A_p. A figura 27 (d) apresenta os efeitos da partida e comutação na corrente rotórica. A figura 27 (e) apresenta o perfil da curva de velocidade. Pode-se notar que efeitos da comutação não

são relevantes no comportamento da velocidade do motor. A figura 27 (f) apresenta os perfis de conjugado motor e de carga. A carga é configurada para um terço do valor nominal, 6,0 N.m, durante o transitório de partida, e logo que o fechamento do motor é alterado para triângulo, a carga aplicada é alterada para o seu valor nominal de 18,50 N.m. É possível observar os picos de conjugado durante a partida em estrela e depois durante a comutação.

Figura 27 - Resultados de simulação da chave de partida estrela-triângulo; (a) simulação da chave de partida estrela-triângulo no software Matlab/Simulink®; (b) tensões trifásicas; (c) correntes estáticas; (d) correntes rotóricas; (e) Curva da velocidade em pu. (f) curvas de torque x velocidade em pu



4.2.3 Vantagens e desvantagens de soft-starter

Pode-se elencar como vantagens da chave de partida estrela-triângulo:

- Redução da corrente de partida: Uma das principais vantagens do método de partida estrela-triângulo é a considerável redução da corrente de partida em relação à partida direta, o que evita afundamentos severos de tensão;
- Redução dos picos de conjugado: A redução dos picos de conjugado na partida diminui o estresse mecânico e térmico durante o processo de partida;
- O custo desta chave de partida é relativamente barato, e possui dimensões físicas bastante reduzidas o que não impacta em aumento do CCM;

E as desvantagens da chave de partida estrela-triângulo são:

- Esta chave de partida é aplicável apenas quando a tensão da rede é equivalente à tensão do motor com fechamento em triângulo;
- O tempo de transição entre as etapas com fechamento em estrela e triângulo deve ser cuidadosamente calculado, o que pode ser um desafio em aplicações que exigem um rápido aumento da velocidade do motor.

4.2.4 Principais aplicações de soft-starter

A partida estrela-triângulo é amplamente aplicado em diversas aplicações industriais que envolvem motores de indução trifásicos de média a alta potência (Weg,2005). Suas características de redução de corrente de partida e proteção do sistema elétrico o tornam ideal para os seguintes cenários:

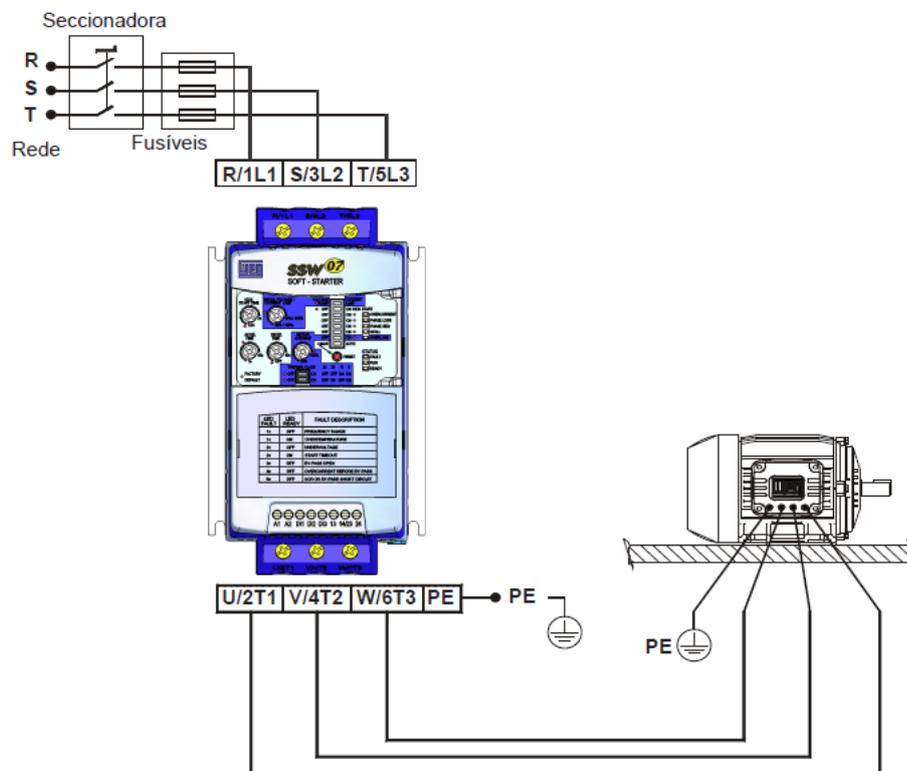
- Bombas: Em sistemas de bombeamento de água para irrigação agrícola ou abastecimento público, motores de alta potência são comuns;
- Máquinas de processamento industrial: Em indústrias que utilizam máquinas de grande porte, como prensas, laminadoras e extrusoras;
- Compressores de ar e gás: Frequentemente encontrados em processos industriais e sistemas de refrigeração;
- Sistemas de ventilação e exaustão: Em sistemas de ventilação e exaustão industrial nos quais motores de alta potência são utilizados para mover grandes volumes de ar;

- Elevadores e sistemas de transporte: Aplicações industriais como elevadores de cargas, esteiras transportadoras;
- Moinhos e trituradores: Em aplicações que envolvem a moagem ou trituração de materiais sólidos, como na indústria de mineração e processamento de materiais;

4.3 Chave de partida soft-starter

Nesta seção será apresentada a chave de partida suave ou soft-starter aplicada em motores de indução trifásicos. O modo de operação das Soft-Starters é fundamentado na implementação de uma ponte de tiristores (SCRs) disposta em configuração antiparalelo. Essa ponte é controlada por meio de uma placa eletrônica, permitindo o ajuste da tensão de saída de acordo com a programação prévia realizada pelo usuário. Há diversos modelos de soft-starters no mercado, a marca nacional WEG oferece uma variedade de versões com potências e configurações distintas. A figura 28 apresenta um esquemático da chave de partida suave SSW-07 da WEG.

Figura 28: Chave de partida soft-starter SSW-07



Fonte :WEG, Manual da SSW-07

4.3.1 Descrição da soft-starter

O dispositivo de partida soft-starter opera controlando gradualmente a tensão aplicada ao motor durante a partida, evitando picos de corrente e choques mecânicos que podem ocorrer em partidas diretas. Isso é alcançado por meio de dispositivos semicondutores de potência, como tiristores ou transistores, que variam a tensão fornecida ao motor de acordo com a programação configurada. Além das funções principais, o equipamento pode integrar outras características, tais como proteção, comunicação e monitoramento, conforme a escolha do fabricante ou as exigências específicas do cliente. Por ser um dispositivo digital, diversas ferramentas de controle podem ser vinculadas a ele.

A chave também pode atuar na parada do motor e possui um método de economia de energia que funciona por meio do ajuste preciso do ângulo de disparo dos tiristores. Este equipamento também consegue adaptar o torque gerado de acordo com a carga, assegurando que a corrente necessária para a partida seja a menor possível. É fundamental observar que essa chave de partida é capaz de controlar o valor RMS da tensão mesmo durante a parada do motor. Isto permite um certo controle na desaceleração do motor, característica útil em aplicações onde é necessário evitar paradas bruscas, como transportadores de carga ou máquinas que exigem frenagem controlada.

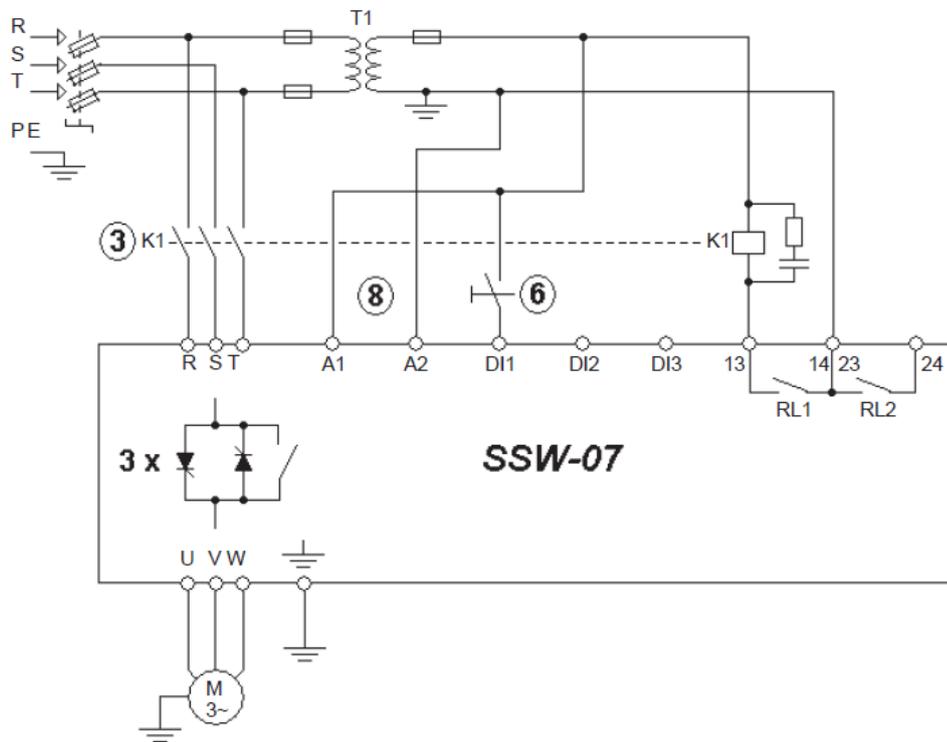
A soft-starter também é projetada para garantir a segurança do motor e do sistema elétrico. Ela incorpora proteções avançadas, como monitoramento de corrente, detecção de sobrecarga e falha de fase (Doe R, 2019). Essas funcionalidades ajudam a prevenir danos ao motor, minimizar tempos de inatividade não previstos e reduzir custos de manutenção. Além disso, a soft-starter contribui para a eficiência energética através de um sistema de economia de energia.

4.3.2 Análise prática de Soft-starter

A figura 29 apresenta o esquema da montagem prática utilizada neste trabalho. A soft-starter foi parametrizada para iniciar o ciclo com 40% da tensão nominal e parada com 30% da tensão nominal. Também foram definidos o tempo de partida e o tempo de parada. Alguns detalhes de controle como subcorrente, sequência de fase, entradas digitais e outros itens parametrizáveis foram configurados seguindo o guia de programação disponibilizado pela fabricante (Manual de programação da SSW07, 2015).

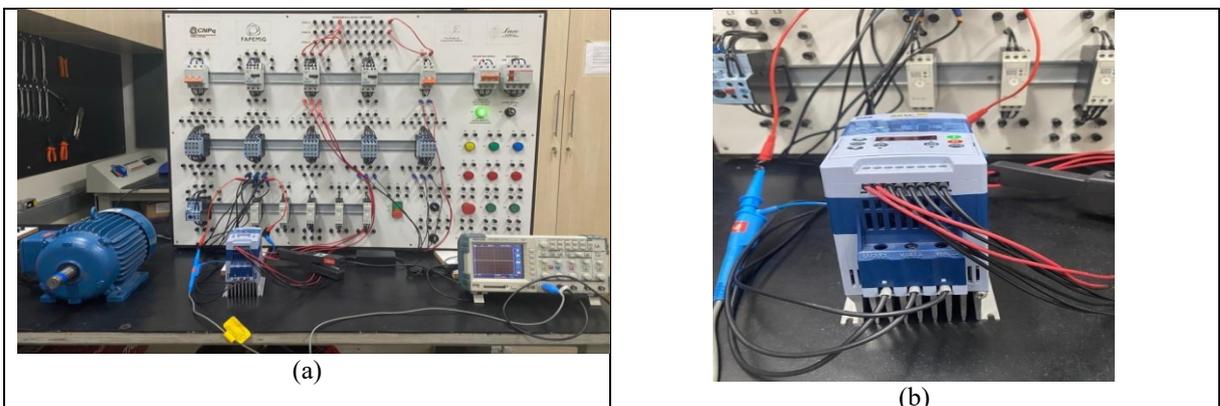
A figura 30 (a) mostra a bancada de acionamentos que foi utilizada para ancorar a chave soft-starter, e a figura 30 (b) apresenta os esquemas de ligação de potência e do motor para a chave em questão. As curvas apresentadas nas figuras 30 (c) e 30 (d) são respectivamente a tensão e a corrente da chave durante a partida. Convém ressaltar que a chave atua apenas durante a partida do motor. Após atingir a tensão nominal do motor, o controle aciona o circuito de by-pass, e o motor passa a ser alimentado diretamente da rede de suprimento.

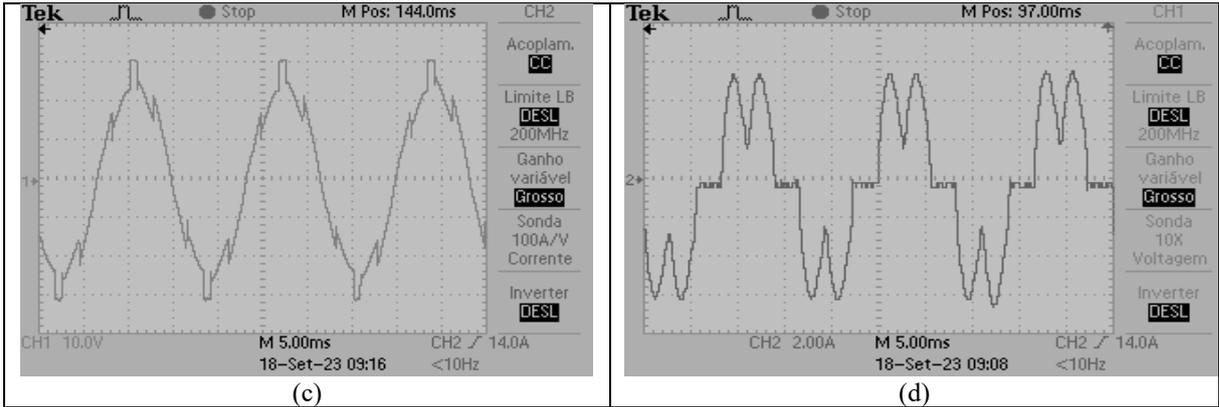
Figura 29: Aplicação da chave de partida soft-starter no acionamento de motores; (a) bancada de acionamentos; (b) foto das conexões na SSW-07;



Fonte: WEG (www.weg.net)

Figura 30: Aplicação da chave de partida soft-starter no acionamento de motores; (a) bancada de acionamentos; (b) foto das conexões na SSW-07; (c) forma de onda da tensão; (d) forma de onda da corrente

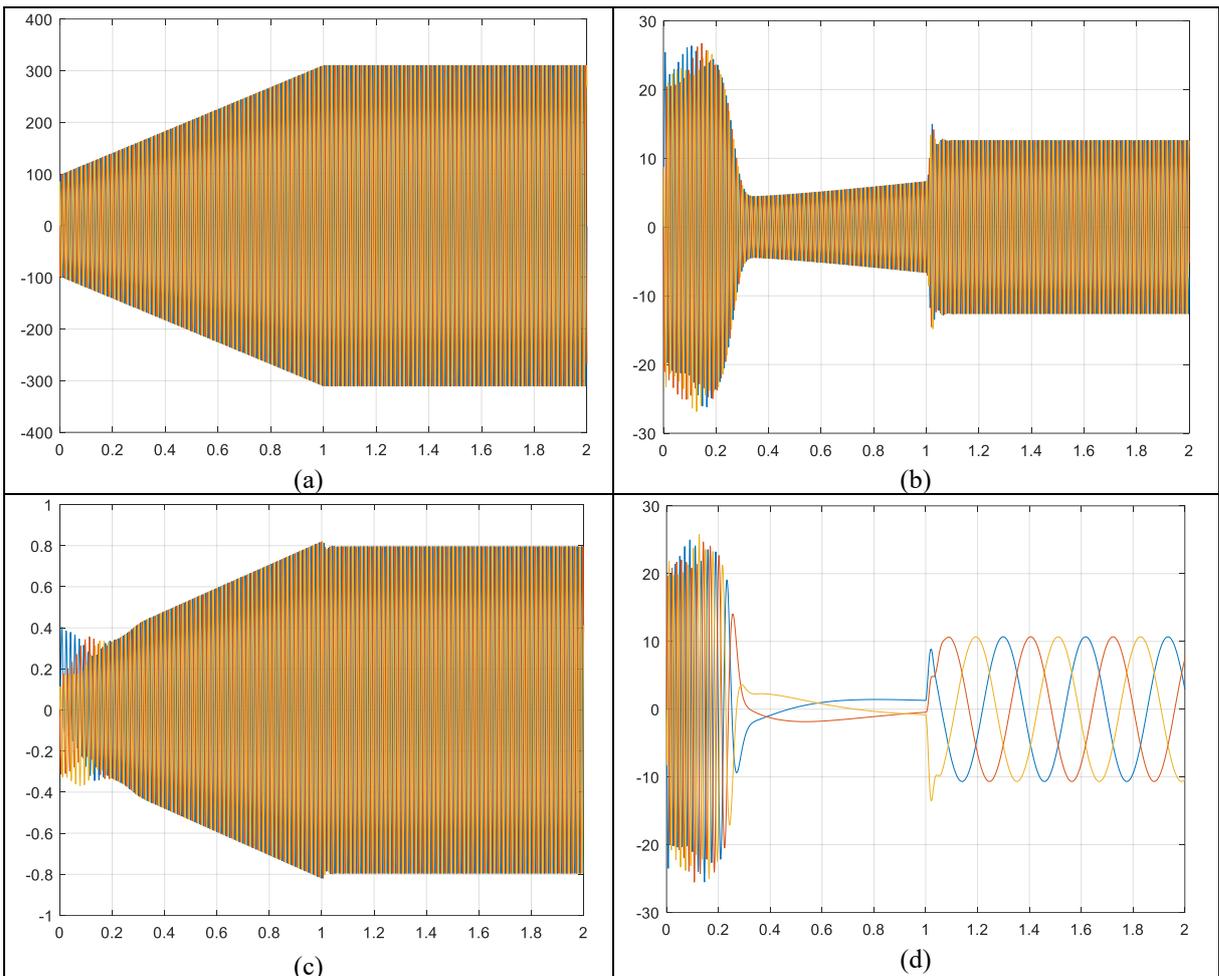


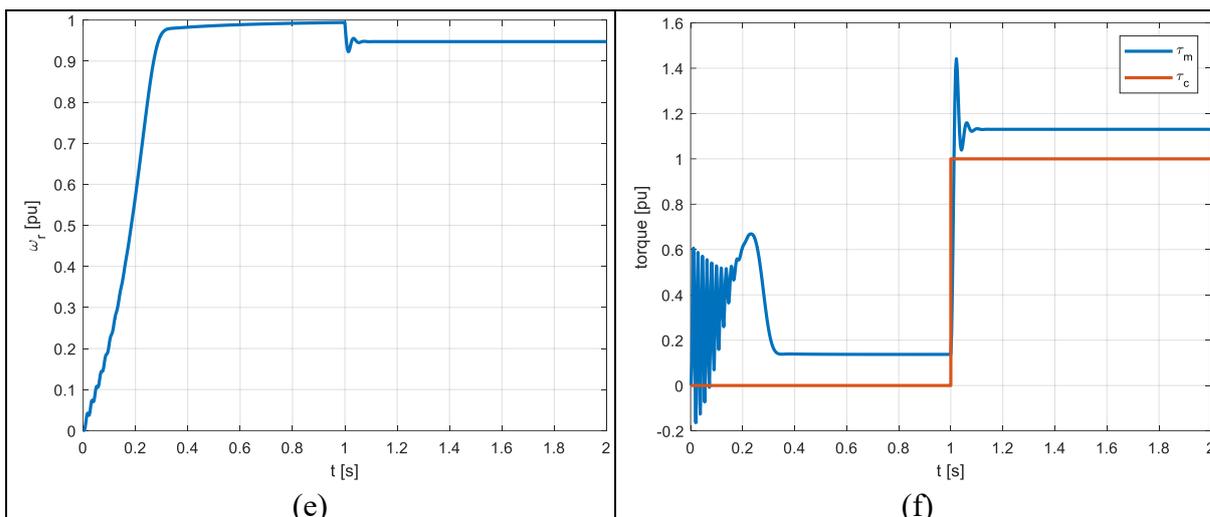


Fonte: Autor.

As figuras 31 (a)-(f) apresentam alguns resultados de simulação desta chave de partida. A figura 31 (a) mostra a rampa de tensão aplicado ao motor, enquanto a figura 31 (b) apresenta a corrente estatórica. Em ambos é possível observar que as solicitações mecânicas devido aos picos de corrente foram reduzidos.

Figura 31 - Resultados de simulação da chave de partida soft-starter





Fonte: Autor

A Figura 31 (c) mostra o perfil do fluxo do estator durante a partida. É importante salientar que o fluxo não se mantém constante e que é reduzido devido à redução da tensão do motor. A figura 31 (d) apresenta as correntes rotóricas em seu referencial próprio, enquanto a figura 31 (e) mostra o perfil da velocidade em pu, e a figura 31 (f) mostra os perfis do conjugado motor e conjugado de carga para a partida em questão. As solicitações mecânicas foram reduzidas, atenuando os picos de conjugado.

4.3.3 Vantagens e desvantagens de Soft-starter

A soft-starter apresenta diversas vantagens e desvantagens em seu uso, tornando-a uma escolha adequada em determinadas situações, mas não necessariamente a melhor opção em todas as aplicações (Weg, 2021).

E as vantagens são:

- Corrente de partida próxima à corrente nominal: Evita picos de corrente e reduz o estresse no motor;
- Oferece flexibilidade operacional, quanto à quantidade de partidas por ciclo de trabalho. Cada soft-starter possui configuração e limites próprios;
- Longa vida útil, pois não possui componentes eletromecânicos móveis: Reduz a necessidade de manutenção.
- Torque de partida próximo ao torque nominal: Garante uma partida suave e eficiente.
- Pode ser utilizada para desacelerar o motor também: Adiciona versatilidade ao controle de velocidade.

Esta chave de partida também apresenta algumas desvantagens como:

- Aumento de custo de instalação e manutenção da chave de partida;
- Adequação da instalação e configuração da soft-starter uma vez que esta chave é mais complexa em comparação com métodos mais simples, exigindo mão de obra especializada.

4.3.4 Principais aplicações da soft-starter

Segundo a WEG (2013), a chave de partida soft-starter tem diversas aplicações principais em uma variedade de setores e equipamentos. Algumas das principais aplicações incluem:

- Bombas: Bombas centrífugas e alternativas em setores como saneamento, irrigação e petróleo;
- Ventiladores / exaustores / sopradores;
- Compressores de ar e refrigeração, incluindo modelos parafuso e pistão;
- Equipamentos de mistura / Aeração;
- Motores de centrífugas utilizados em diversos contextos;
- Equipamentos de trituração/moagem como britadores, moedores, picadores de madeira e refinadores de papel;
- Fornos rotativos;
- Serras e plainas (madeira);
- Moinhos (bolas/martelo);
- Transportadores de carga: Diferentes tipos de transportadores, incluindo correias, cintas, correntes, mesas de rolos, sistemas de trilhos, rodas d'água, escadas rolantes, esteiras de bagagem em aeroportos e linhas de engarrafamento.

4.4 Acionamento do MIT por Inversor

A utilização de inversores de frequência surge como uma solução eficaz para o acionamento a velocidade variável dos motores de indução trifásicos. Segundo (Fitzgerald et

al, 2003), os inversores permitem um controle preciso da velocidade do motor, além da redução das correntes de partida. Segundo (Silva et al, 2007), os inversores podem ser utilizados tanto para o acionamento direto dos motores quanto para o controle da velocidade em sistemas com vários motores. Também destaca que os conversores podem ser programados para operar em diversas condições operacionais, aumentando assim a flexibilidade das aplicações industriais.

4.4.1 Descrição de inversor de frequência

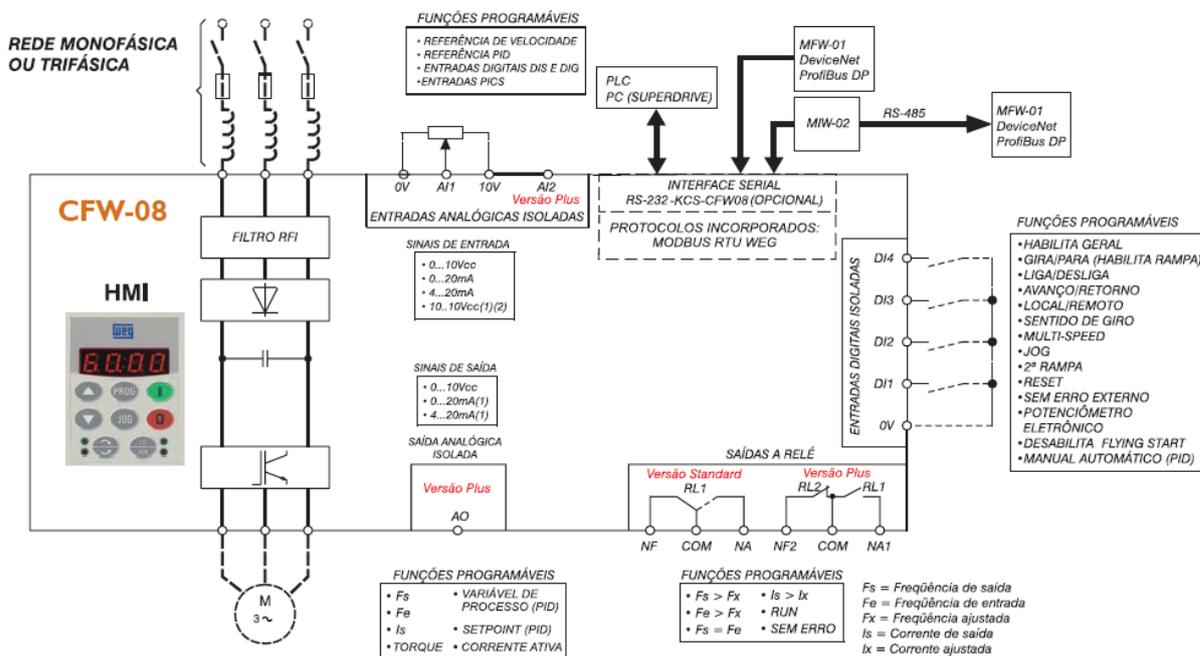
De acordo com (Smith, 2021), O inversor de frequência opera convertendo corrente contínua em corrente alternada com frequência variável, permitindo um controle preciso da velocidade do motor."

A figura 32 apresenta o diagrama de blocos funcionais de um inversor de frequência, também conhecido como drive de frequência variável ou VFD (Variable Frequency Drive). É apresentada uma descrição dos componentes principais do dispositivo, e as diversas funcionalidades que o equipamento proporciona. Destaca-se que o inversor vai além de apenas controlar velocidade ou conjugado, ele também agrega diversas funções de controle, monitoramento e proteção do motor.

Segundo a (WEG, 2016), o inversor além de permitir controle de velocidade, ele também é aplicado em controle preciso de variáveis como torque, velocidade e posicionamento, aumentando a performance do acionamento tanto em situações estáticas quanto dinâmicas. Além disso, possui uma alta capacidade de sobrecarga, o que contribui para o aumento da produtividade, qualidade e eficiência energética nos processos em que é aplicado.

Um bloco de diagrama simplificado de um inversor de frequência da WEG seria um esquema visual que representa as principais partes e funcionalidades desse dispositivo. Um inversor de frequência, também conhecido como drive de frequência variável ou VFD (Variable Frequency Drive), é um dispositivo eletrônico utilizado para controlar a velocidade de motores elétricos AC ajustando a frequência e a tensão fornecidas ao motor. Conforme mostrado na figura 32 abaixo.

Figura 32 - Bloco de diagrama simplificado de inversor da frequência



Fonte: WEG, manual do inversor CFW-08.

Os inversores de uma forma geral possuem recursos adicionais, como proteção contra sobrecorrente, proteção contra sobretensão, proteção contra subtensão e proteção contra curto-circuito. Os inversores também oferecem modos de operação avançados como controle vetorial e controle de conjugado que permitem o controle do motor de forma mais precisa e eficiente. Há também opções de inversores que trabalham de forma regenerativa muito útil para fluxo bidirecional de energia.

Segundo (Brown, 2019), o inversor de frequência oferece uma série de vantagens, incluindo a capacidade de partida suave do motor, economia de energia e controle de torque preciso. Além disso, ele é fundamental para aplicações que exigem variação na velocidade, como bombas, ventiladores e esteiras transportadoras. O controle preciso de torque é outra característica notável do inversor de frequência. O inversor permite ajustar o torque de saída conforme necessário, tornando-o adequado para tarefas que exigem precisão, como em máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado). O inversor desempenha funções importantes na automação industrial, contribuindo para melhorias na eficiência e confiabilidade dos processos industriais.

Apesar dos benefícios proporcionados pelos inversores de frequência, seu uso pode apresentar alguns desafios. Um desses desafios é a geração de harmônicas na tensão e corrente do motor. Essas harmônicas podem causar aquecimento excessivo e redução da vida útil do motor (Fitzgerald et al., 2003). Portanto, é muito importante o uso de filtros adequados para

mitigar os efeitos das harmônicas. Os harmônicos produzidos pelo inversor podem afetar outros equipamentos conectados ao sistema. Portanto, é essencial realizar estudos e planejamento adequados ao implementar um inversor de frequência em um sistema industrial.

4.4.2 Métodos de controle dos inversores de frequência

Segundo WEG (2005), o controle dos inversores de frequência pode ser dividido em 2 métodos: controle escalar e controle vetorial.

No controle escalar, os inversores de frequência controlados por escalar operam com a estratégia "V/F Constante" para manter o torque do motor constante, ajustando a tensão de acordo com a frequência. A queda de tensão na resistência do estator se torna insignificante em frequências acima de 30 Hz. O controle proporcional da corrente no estator é alcançado variando a tensão da fonte conforme a frequência de alimentação, aproximando-a da corrente nominal do motor.

O controle vetorial é aplicado em cenários que exigem elevado desempenho dinâmico, resposta ágil e precisa regulação de velocidade e torque. Embora os motores de corrente contínua tenham sido tradicionalmente ideais para esse propósito, permitindo controle direto por meio da relação entre corrente de armadura, fluxo e torque, o progresso na eletrônica de potência e o avanço e redução de custos dos microcontroladores estabeleceram os motores de indução como protagonistas nessas aplicações.

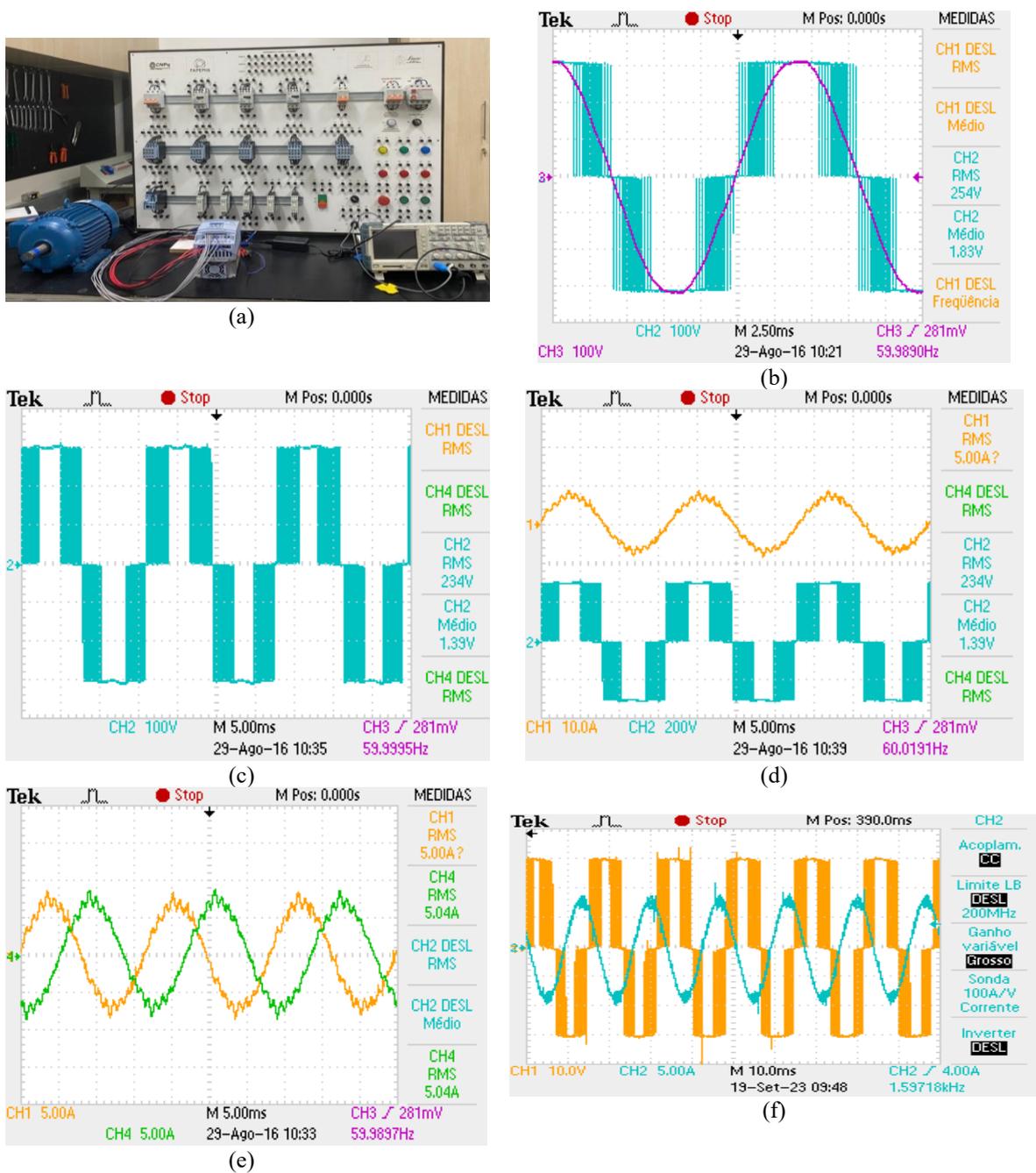
4.4.3 Análise prática do inversor

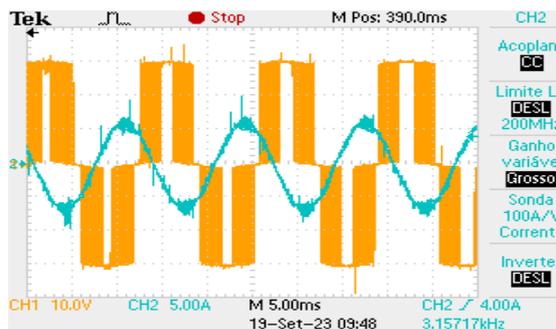
A figura 33 (a) apresenta a bancada de acionamentos base para a utilização do inversor em diversos modos de operação. Neste estudo, utilizou-se o modo local e controle via IHM. Após a montagem realizada na bancada, foram obtidos dois conjuntos de resultados das curvas: um referente ao controle escalar e outro referente ao controle vetorial. Como o motor está a vazio, os resultados do controle escalar e vetorial são bastante semelhantes, e por isto neste trabalho optou-se por apresentar apenas os resultados do controle vetorial, que são mostrados nas figuras 33 (b)-(h).

No controle vetorial, a estimação dos parâmetros do motor é um procedimento importante pois eles alimentam a malha de velocidade, de forma a ter-se um ajuste fino na velocidade. Todos estes procedimentos são realizados via atuação nos parâmetros do inversor. Para este estudo variou-se a referência de velocidade para frequências correspondentes de 10 Hz a

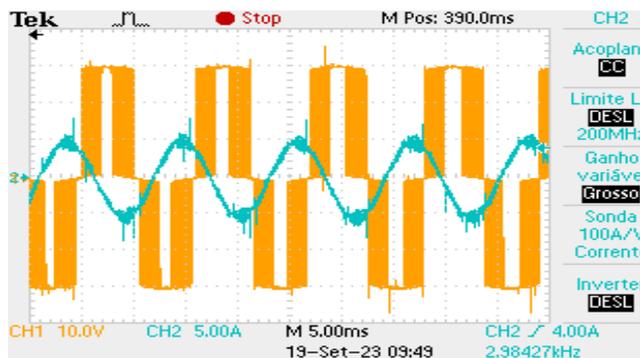
90 Hz. As formas de onda de tensão e o valor filtrado para a situação de 60 Hz são mostradas na figura 33 (b) e 33 (c). Pode-se perceber que a tensão moduladora para este controle é senoidal. As figuras 33 (d) e 33 (d) apresentam as formas de onda de corrente, e a sua relação com tensão aplicada no motor. Nota-se que as correntes são senoidais, o que mantém o campo magnético girante do estator. As figuras 33 (f)-(h) apresentam as tensões nos terminais do motor e as correntes de linha do motor para frequências acima de 60 Hz.

Figura 33 - aplicação do controle vetorial em motores; (a) bancada de acionamentos; (b) tensões de linha a 60 Hz; (c) tensão chaveada a 60 Hz; (d) tensão e corrente de linha a 60 Hz; (e) correntes de linha a 60 Hz; (f) tensão e corrente de linha 60 Hz; (g) tensão e corrente de linha a 75 Hz; (h) tensão e corrente de linha a 90 Hz;





(g)



(h)

Fonte: Autor

4.4.4 Vantagens e Desvantagens do inversor

Segundo (Ponhe, 2019), a ampla utilização dos inversores de frequência se deve a algumas vantagens de uso aplicadas em motores elétricos como:

- Economia de energia: Reduz o consumo de energia em diversos processos, resultando em economia significativa nos custos finais de produção;
- Redução dos picos de corrente da partida dos motores: Diminui os valores de pico de corrente dos motores durante as partidas;
- Aumento da produtividade: Aprimora a precisão e eficiência das operações no processo de produção, resultando em ganho de produtividade;
- Proteção dos motores contra surtos elétricos: Garante proteção aos motores contra surtos vindos da rede de alimentação;
- Instalação simples: Facilita o processo de instalação e aumenta a segurança ao substituir variadores mecânicos e eletromagnéticos;
- Redução dos custos de manutenção: Apesar do alto custo inicial, reduz os gastos com manutenção ao garantir uma vida útil operacional mais longa para o motor e os elementos no processo;

Apesar das vantagens dos inversores em termos de melhorar o desempenho dos motores elétricos há contudo algumas desvantagens:

- Custo inicial elevado: A aquisição inicial tem um custo consideravelmente alto, tornando-o menos atraente para aplicações de pequena escala;
- Necessidade de manutenção especializada: Requer manutenção realizada por técnicos especializados devido à sua natureza sofisticada, o que gera custos adicionais à

operação;

- A distorção harmônica na rede: resulta na diminuição do rendimento devido às perdas causadas pelos harmônicos provenientes da tensão de alimentação não senoidal;
- Além disso, há um aumento no nível de ruído relacionado à frequência e ao conteúdo harmônico do conversor (Moraes, Miranda, 2014);

4.4.5 Principais aplicações de inversor

Segundo a (WEG, 2005), dentre as principais aplicações do inversor algumas que se destacam:

- Bombas Centrífugas: Os inversores de frequência são amplamente utilizados para controlar a velocidade de bombas centrífugas em sistemas de abastecimento de água, sistemas de esgoto, sistemas de aquecimento e resfriamento, entre outros;
- Ventiladores/Exaustores: Para sistemas de ventilação e exaustão, os inversores de frequência permitem controlar a velocidade dos ventiladores para atender às demandas de ventilação de forma eficiente;
- Agitadores/Misturadores: Em processos industriais que requerem mistura ou agitação de líquidos, os inversores de frequência são usados para controlar a velocidade dos agitadores e garantir a mistura adequada;
- Extrusoras: Nas indústrias de plástico e borracha, extrusoras são usadas para moldar materiais. Inversores de frequência são usados para controlar a velocidade da extrusora, garantindo a qualidade do produto;
- Esteiras Transportadoras: Em sistemas de transporte automatizado, os inversores de frequência são usados para controlar a velocidade das esteiras, ajustando o fluxo de produtos;
- Mesas de Rolos: Nas indústrias de embalagem e logística, mesas de rolos são usadas para movimentar cargas. Inversores de frequência permitem controlar a velocidade das mesas;
- Granuladores/Peletizadoras: Na indústria de processamento de plásticos e alimentos, inversores de frequência são usados para controlar a velocidade de granuladores e peletizadoras;
- Secadores/Fornos Rotativos: Em processos que envolvem secagem ou aquecimento, os

inversores de frequência são empregados para controlar a temperatura e a velocidade dos secadores e fornos rotativos;

- Filtros Rotativos: Em processos de separação e filtração, os inversores de frequência controlam a velocidade dos filtros rotativos para otimizar a eficiência do processo;
- Bobinadores: Em indústrias que envolvem processos de enrolamento e desenrolamento, como na fabricação de papel ou materiais têxteis, os inversores de frequência são usados para controlar a tensão e a velocidade;
- Máquinas de Corte e Solda: Em processos de corte e soldagem, os inversores de frequência permitem controlar a velocidade e a precisão das máquinas;

4.5 Considerações finais

Técnicas de acionamento como, chaves de partida direta, estrela triângulo e soft-starter, e os inversores, são amplamente utilizadas em processos industriais que envolvem motores elétricos. Das partidas eletromecânicas de partida a equipamentos eletrônicos de acionamento e controle de motores observa-se uma evolução constante na busca por processos mais eficientes e sustentáveis.

Essas soluções não apenas mitigam impactos mecânicos e elétricos, mas também abrem portas para uma gestão mais inteligente e adaptável dos motores industriais. O desenvolvimento industrial, impulsionado por essas tecnologias, não é apenas uma modernização superficial, mas uma revolução que ecoa na eficiência operacional e no uso responsável dos recursos. O progresso da indústria de um país está intrinsecamente ligado à adoção consciente dessas ferramentas, abrindo caminho para um futuro no qual inovação e sustentabilidade se entrelaçam de maneira harmoniosa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou e estudou sistemas de acionamentos de motores de indução trifásicos, destacando as chaves de partida direta, estrela-triângulo e soft-starter, além de estudar o inversor de frequência como equipamento de acionamento, enfatizando suas aplicações em cenários industriais.

O estudo abordou partes teóricas e experimentais, além da simulação digital dos dispositivos de partida dos motores com o intuito de fornecer uma visão abrangente das vantagens e desafios associados à cada um deles. No decorrer desta pesquisa, foi possível constatar que a escolha do método de acionamento a ser utilizado em uma aplicação industrial depende de uma série de fatores, incluindo a carga do motor, os requisitos de controle de velocidade, o consumo de energia e as limitações orçamentárias. Cada um dos métodos estudados apresenta características distintas que os tornam adequados para diferentes cenários.

A chave de partida direta é uma abordagem simples e econômica, mas pode causar picos de corrente que afetam a rede elétrica e os componentes do motor. A partida estrela-triângulo ajuda a mitigar esses picos de corrente, mas é limitada em termos de controle de velocidade. A soft-starter representa uma solução intermediária, proporcionando redução controlada da corrente durante a partida e a capacidade de controle de velocidade, embora em menor medida do que um inversor de frequência. Por outro lado, o inversor de frequência oferece um controle de velocidade preciso, mas pode ser mais caro e complexo.

A parte experimental deste estudo envolveu a implementação prática de cada um dos métodos das partidas, permitindo a observação direta de seu desempenho em situações reais. Os resultados obtidos destacaram as diferenças entre os métodos, além de possibilitar considerações práticas para a instalação e manutenção desses sistemas nas aplicações industriais.

A simulação permitiu a análise de cenários hipotéticos e a avaliação do comportamento dos sistemas em condições extremas ou incomuns. Essa abordagem forneceu informações valiosas para a tomada de decisões e o planejamento de sistemas de acionamento em uma etapa inicial do projeto. Portanto, é recomendado que os projetistas e engenheiros avaliem cuidadosamente as características e necessidades específicas de cada aplicação industrial, a fim de selecionar a estratégia de acionamento mais adequada. Além disso, é importante considerar a possibilidade de combinar diferentes estratégias de acionamento, de acordo com os requisitos operacionais de cada fase do processo industrial.

No contexto específico de Timor-Leste, onde o desenvolvimento industrial emerge como um componente vital para impulsionar o crescimento econômico, é importante a tomada de decisões estratégicas que impulsione a expansão e fortalecimento do setor industrial no país, oferecendo oportunidades para diversificação econômica, geração de empregos e avanço tecnológico.

É necessário medidas de suporte adequadas e compreensão abrangente das necessidades específicas do Timor-Leste para o aproveitamento do potencial industrial, de forma que se aproveite a evolução constante da tecnologia e as soluções inovadoras no desenvolvimento industrial do país. Tais esforços desempenham papel fundamental no progresso econômico, na geração de oportunidades de emprego e na promoção da inovação, contribuindo para um futuro próspero e sustentável para o país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO M. **Café de Timor-Leste: raro e um dos melhores do mundo**, 2019. Disponível em: <<https://www.conexaolusofona.org/cafe-de-timor-leste-raro-e-um-dos-melhores-do-mundo/>>. Acesso em: 27 Setembro 2023.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK. **Timor-Leste: Economy**, 2023. Disponível em: <<https://www.adb.org/countries/timor-leste/economy>>. Acesso em: 10 SETEMBRO 2023.
- BAPTISTA, P. F. C. **Indústria Transformadora em Timor-Leste: uma proposta para um setor industrial**. Minho: [s.n.], 2015.
- BELO, C. A. D. C. **Coordenação da qualidade do café na cadeia agro-comercial: análise do caso das empresas que produzem e comercializam o café em Timor-Leste**. Évora. 2017.
- BOLDEA, I.; & NASAR, S. A. **The Induction Machine Handbook**. CRC Press, 2006.
- BOSE, B. K. **Modern Power Electronics and Drives**. Prentice Hall, 2002.
- BROWN, A. **Electrical Motor Control: Principles & Applications**. Routledge, 2019.
- BROWN, J. The Impact of Three-Phase Induction Motor in Industrial Application. **Journal of Industrial Technology** , p. 150-159, 2019.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. McGraw Hill, 2005.
- CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 5ª. ed. McGraw-Hill, 2013.
- COSTA, A.; SILVA, L.; & BORGES, B. Controle Vetorial direto de Motores de indução Trifásicos. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, São-Paulo, 2018.
- DABNEY, J. B & HARMAN, T. L. **Mastering Simulink**. Pearson Education. 2004
- DADOS MUNDIAIS. **Timor-Leste em tempo real**, 2023. Disponível em: <<https://www.dadosmundiais.com/asia/timor-leste/index.php>>. Acesso em: 5 Outubro 2023.
- DAVID, R. **Electric Motors and Drives: Fundamentals Types and Applications**. Oxford: Newnes, 2017.
- DOE, R. **Soft-Starters Parameters and Motor Protection**. Rijeka: InTech, 2018.
- DURAND, F. **Historia de Timor-Leste: Da Pré-Historia à Actualidade**. Editora lidel, 2010
- FARADAY, M. **Experimental Researches in Electricity**. Londres: Royal Society, 1831.

- FITZGERALD, A. E.; & KINGSLEY, C. **Maquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 6ª. ed. Artmed Editora, 2014.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. McGraw Hill, 2003.
- FOLHA DE SÃO PAULO. **Notícias Sobre Timor-Leste**, 2023. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/folha-topicos/timor-leste/>>. Acesso em: 1 Outubro 2023.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4ª. ed. São Paulo: Érika Ltda, 2008.
- GUIMARÃES, A. C.; & RODRIGUES, F. J. **Motores Elétricos: Descrição e Aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2005.
- GUNN, G. C. **Historical Dictionary of East Timor**. Scare Crow Press, 2011.
- JORNAL DA REPÚBLICA. **Resolução do Governo**, 2014. Disponível em: <<https://mj.gov.tl/jornal/?q=node/6515>>. Acesso em: 15 Setembro 2023.
- JOHNSON, S. **Synchronous and Asynchronous Motors: Principles, Performance, and Maintenance**. CRC Press, 2017.
- JONES, M. **Electrical Engineering Principles and Applications**. Londres: Pearson Ltda, 2018.
- KALATEC AUTOMAÇÃO. **Inversor de Frequência: Como Funciona, Tipos e Vantagens**., 2021. Disponível em: <<https://blog.kalatec.com.br/inversor-de-frequencia>>. Acesso em: 20 Setembro 2023.
- KINGSBURY, D. **Timor-Leste: A Nation of Peace**. Monash University Press. 2015
- MARÇAL, D. C. M. **Desenvolvimento para o Timor-Leste: Uma análise de política industrial**. Redenção. 2017.
- KRAUSE, C. **Design of Electrical Machines**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.
- MAMEDE, F. J. **Instalações Elétricas Industriais**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.
- MINISTÉRIO Finanças. **Timor-Leste: Population and Housing Census 2022**, 2022. Disponível em: <https://inetl-ip.gov.tl/wp-content/uploads/2023/04/Census-Preliminary-results-2022-for_web.pdf>. Acesso em: 25 Setembro 2023.
- NASCIMENTO, C. J. G. **Maquinas Elétricas: Teoria e ensaios**. 4ª. ed. São Paulo: Érika Ltda, 2018.

- NEVES, B. **O impacto da COVID-19 na economia global e as perspectivas para Timor-Leste**. Dili: La'o Hamutuk, 2020.
- OLIVEIRA, L. C. R. **Motores Elétricos: Princípios e Aplicações**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2016.
- PEREIRA, J. C. M. **Motores Elétricos: Fundamentos e Aplicações**. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, 2015.
- PONHE, L. H. **Inversor de Frequência: O Uso em Motores Elétricos**. Campo-Grande. 2019.
- RODRIGUES, C. M. S.; VIEIRA, F. D.; MARQUÊS, M. **Projeto Timor: uma análise SWOT da indústria em Timor-Leste**. 2013.
- RESENDE, J. T., **Modelagem da máquina de indução trifásica incluindo a saturação magnética – análise dinâmica do gerador de indução autoexcitado**. Tese de doutorado, UFU, 1999.
- SILVA, C. E.; PEREIRA, J. L. C. **Motores Elétricos: Teoria, Projeto e Aplicações**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- SILVA, F. B.; SOUZA, A. M.; AGUIAR, P. R. Controle de velocidade em motores de indução trifásicos utilizando conversores de frequência. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 29, p. 253-262, 2007.
- SILVA, G.; PEREIRA, N.; & COSTA, M. **Timor-Leste: história, sociedade e política**. Lisboa: Tinta da China, 2018.
- SIMONE, G. A. **Maquinas de Indução Trifásicas: Teoria e Exercícios**. São Paulo: Érika, 2000.
- SMITH, E. **Electric Motors: Principles and Applications**. Nova York: McGraw-Hill Education, 2020.
- SMITH, J. **Inversores de Frequência: Princípios de Funcionamento e Aplicações**. 1ª. ed. São Paulo: Érika Ltda, 2021.
- SOARES, C.; PINTO, P.; & FERREIRA, L. **O sector industrial em Timor-Leste: situação atual e perspectivas futuras**. Dili: The Asia Foundation, 2017.
- TIMOR-LESTE. **Timor-Leste Plano Estratégico de desenvolvimento 2011-2030.**, 2011. Disponível em: <http://timor-leste.gov.tl/wp-content/uploads/2012/02/Plano-Estrategico-de-Desenvolvimento_PT1.pdf>. Acesso em: 30 Setembro 2023.

TIMOR-LESTE. **Programa do IX Governo Constitucional**, 2023. Disponível em: <<http://timor-leste.gov.tl/?cat=39#prog4.6>>. Acesso em: 27 Setembro 2023.

UMANS, S. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley** – 6 ed. Artmed Editora, 2014.

WEG. **Guia de Aplicação de Inversor de Frequência**, 2005. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/DiegoRodrigodoPrado/guia-deaplicaodeinversoresdefrequenciaweg3edio>>. Acesso em: 24 Setembro 2023.

WEG. **Guia de Aplicação Soft-Starter**, 2005. Disponível em: <<https://document.onl/documents/weg-guia-de-aplicacao-de-soft-starters-2a-edicao.html?page=263>>. Acesso em: 29 Setembro 2023.

WEG. **Manual de Usuário CFW-08 Inversor de Frequência**, 2009. Disponível em: <<https://vdocuments.net/manual-weg-cfw08.html?page=28>>. Acesso em: 11 Outubro 2023.

WEG. **Catalogo CFW-08 Inversor de Frequência**. Jaragua do Sul. 2014.

WEG. **Manual de Usuário CFW-07 Soft-Starter**, 2021. Disponível em: <<https://manualzz.com/doc/pt/52704850/weg-soft-starter-ssw07-user-manual>>. Acesso em: 19 Setembro 2023.

WEG. **Soft-Starters: Tecnologia avançada para partida suave de motores elétricos**, 2022. Disponível em: <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/hca/h04/WEG-soft-starters-10525004-catalogo-pt.pdf>>. Acesso em: 02 Outubro 2023.

WEG. **Catalogo SSW-07 Soft-Starters**. Jaragua do Sul. 2022.

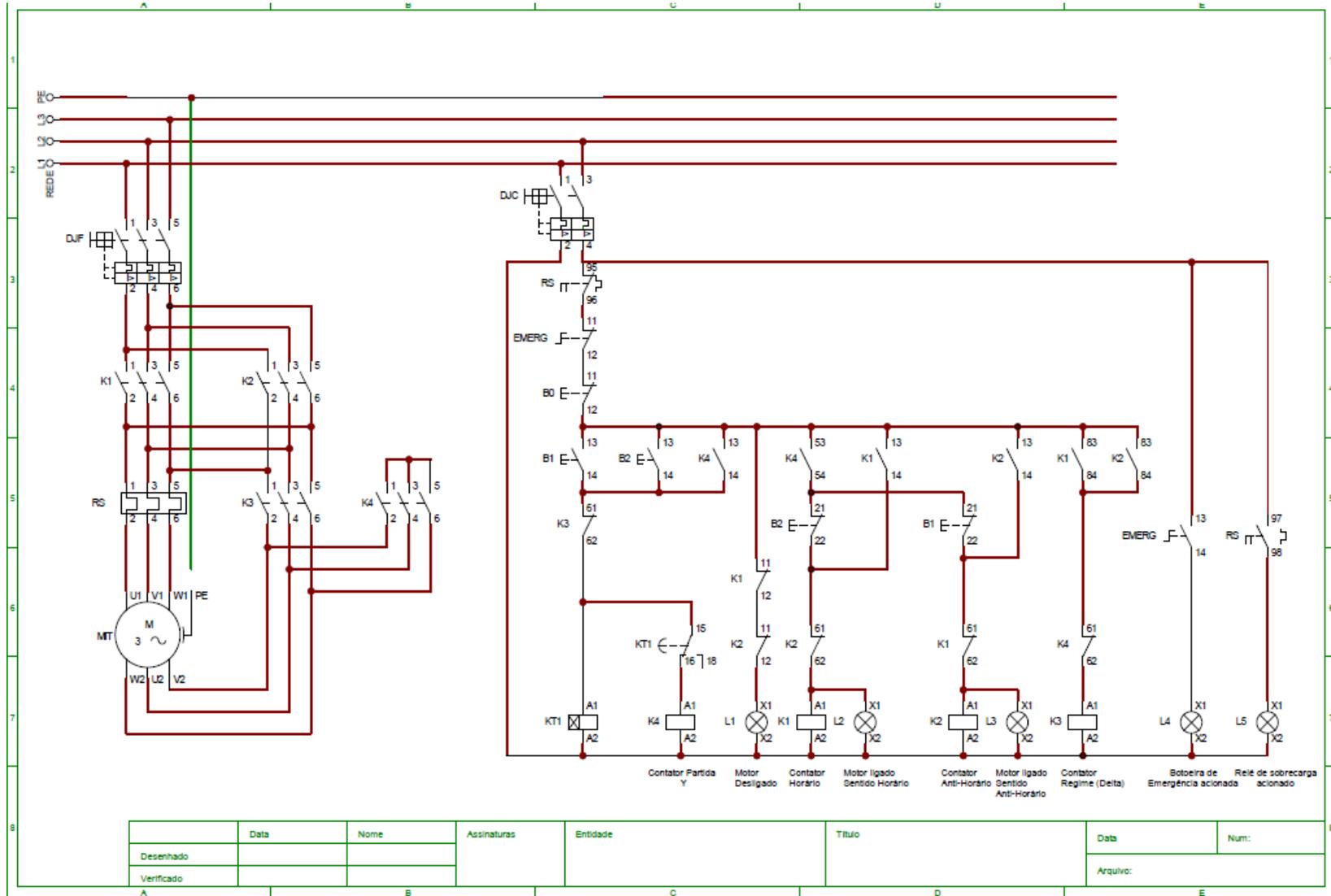
WEG. **Guia de Especificação Motores Elétricos**, 2023. Disponível em: <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 05 Outubro 2023.

WILDI, T. J. **Electric Machines and Drives**. [S.l.]: McGraw-Hill. 2006

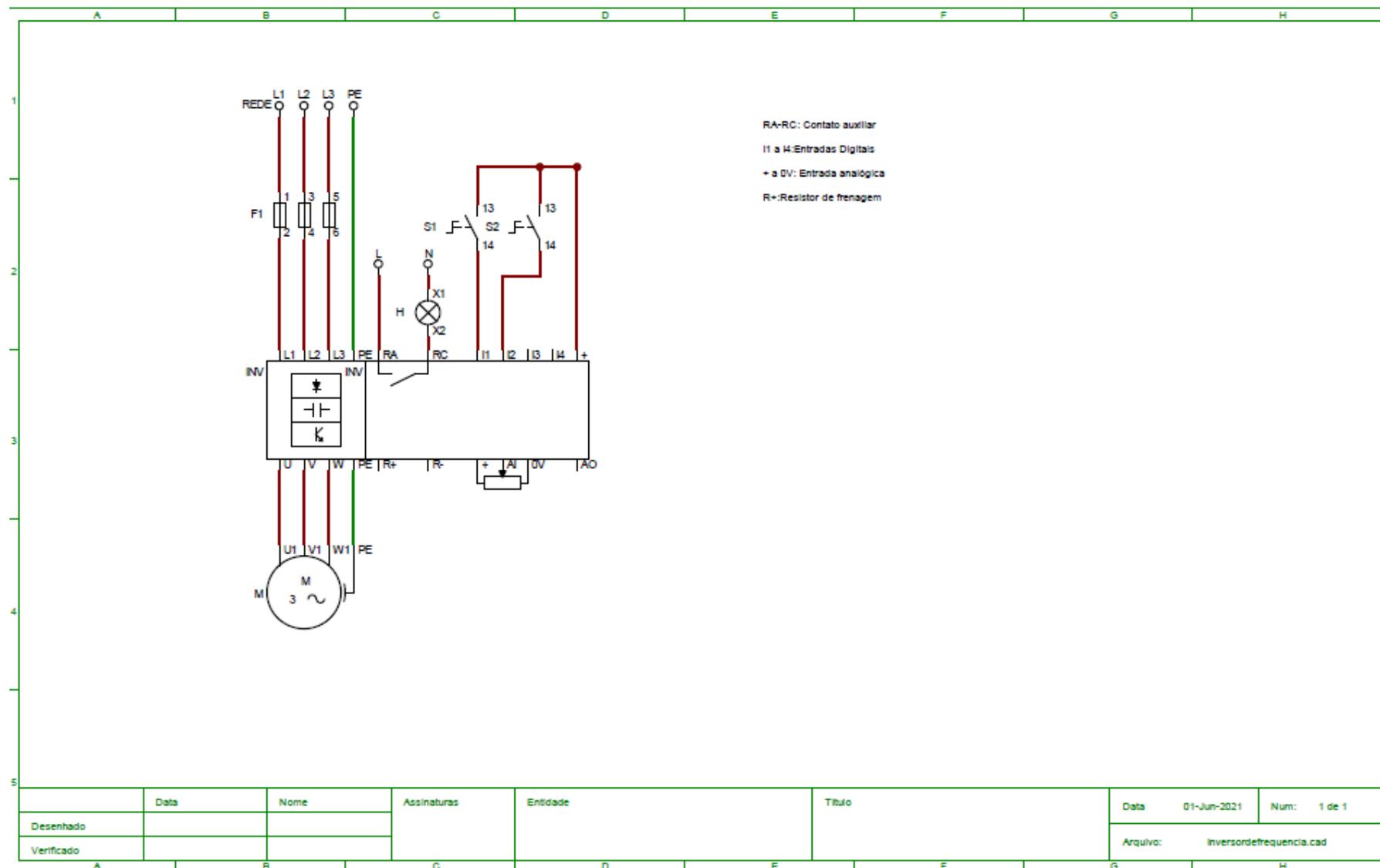
WORLD FOOD PROGRAMME. **Timor-Leste: Annual country report highlights**, 2022. Disponível em: <https://docs.wfp.org/api/documents/WFP0000150178/download/?_ga=2.211451221.1179355709.1697085038-1987707739.1697085038>.

ANEXO A – PARTIDAS SIMULADAS NO SOFTWARE CAD_SIMU

PARTIDA ESTRELA-TRIÂNGULO



INVERSOR DE FREQUÊNCIA



SOFT-STARTER

