

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROTEIROS DE EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO
ELÉTRICO**

Conversão, Transformadores e Máquinas Elétricas

CARLOS HENRIQUE MOREIRA LIMA

Goiânia - Goiás, março de 2025



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Carlos Henrique Moreira Lima

Matrícula: 20201011060158

Título do Trabalho: Roteiros de Experimentos de Laboratório Elétrico - Conversão, Transformadores e Máquinas Elétricas.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



CARLOS HENRIQUE MOREIRA LIMA

ROTEIROS DE EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO ELÉTRICO
Conversão, Transformadores e Máquinas Elétricas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do curso de bacharelado em engenharia elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. Renato Jayme Dias.

Goiânia - Goiás, março de 2025

L732r Lima, Carlos Henrique Moreira.

Roteiros de experimentos de laboratório elétrico: conversão, transformadores e máquinas elétricas / Carlos Henrique Moreira Lima. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2025.
103f.

Orientação: Prof. Dr, Renato Jayme Dias.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Engenharia – estudo e ensino. 2. Laboratórios elétricos. 3. Máquinas elétricas. 4. Transformadores. I. Dias, Renato Jayme (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 537.0724

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e quatro dias do mês de março do ano de dois mil e vinte cinco, às dezessete horas, via webconferência, realizou-se a sessão pública de defesa de Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Goiânia. O trabalho foi intitulado como GUIA DE EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO ELÉTRICO - Roteiros de Conversão, Transformadores e Máquinas Elétricas, desenvolvido pelo discente Carlos Henrique Moreira Lima, matrícula 20201011060158, sob a orientação do professor Dr. Renato Jayme Dias. A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: Dr. Renato Jayme Dias (Orientador e Presidente da Banca Avaliadora), Ma. Camille Reátegui Silva (Membro Externo da Banca Avaliadora), Prof. Me. Charles dos Santos Costa (Membro Interno da Banca Avaliadora). Após a exposição oral do trabalho e arguições dos membros da banca examinadora, por decisão unânime, o trabalho foi aprovado com nota final 10 (dez). Nada mais havendo a tratar, o presidente da banca agradeceu a participação de todos e encerrou a sessão pública de defesa.

Eu, Renato Jayme Dias, orientador e presidente da banca avaliadora, lavrei a presente ATA assinada.

Goiânia, 24 de março de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **RENATO JAYME DIAS**
Data: 21/04/2025 16:05:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Renato Jayme Dias
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Documento assinado digitalmente
 **CAETANO REATEGUI SILVA**
Nome civil: CAMILLE REATEGUI SILVA
Data: 28/03/2025 15:19:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ma. Camille Reátegui Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Norte

Documento assinado digitalmente
 **CHARLES DOS SANTOS COSTA**
Data: 03/04/2025 10:15:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Charles dos Santos Costa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Dedico este trabalho a...

Primeiramente, a Deus, pela dádiva da vida, pela força nos momentos difíceis e por me guiar até aqui.

À minha mãe, pelo amor incondicional, pelo esforço incansável e por ser minha maior inspiração. Sem seu apoio, nada disso seria possível.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, incentivando e acreditando no meu potencial, mesmo nos momentos de incerteza.

Aos colegas de faculdade, que contribuíram com sugestões e apoio, tornando essa jornada mais leve e enriquecedora.

Aos professores, que, com paciência e dedicação, esclareceram dúvidas, ofereceram conselhos e compartilharam conhecimento, ajudando a moldar não apenas este trabalho, mas também minha caminhada profissional.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

RESUMO

A formação de um engenheiro eletricista exige um equilíbrio entre teoria e prática. No entanto, muitas vezes, o ensino tradicional se concentra apenas em conceitos teóricos, dificultando a compreensão de temas fundamentais, como conversão de energia elétrica, transformadores e máquinas elétricas. Diante dessa realidade, este trabalho apresenta um conjunto de roteiros experimentais detalhados para auxiliar no aprendizado prático desses conceitos essenciais. Os experimentos abordam desde os princípios básicos da eletricidade até aplicações mais complexas, como o funcionamento de geradores, motores e transformadores trifásicos. Cada roteiro foi elaborado para guiar o aluno de maneira intuitiva, apresentando explicações claras, ilustrações e diagramas que facilitam a execução das atividades. Além disso, o material inclui instruções detalhadas sobre os equipamentos utilizados e procedimentos de segurança, garantindo que a experiência de laboratório seja eficiente e segura. A proposta deste trabalho vai além de simplesmente apresentar experimentos. Ele busca estimular o raciocínio crítico e a capacidade de resolução de problemas dos estudantes, incentivando a compreender não apenas como os sistemas elétricos funcionam, mas também por que funcionam daquela maneira. Com isso, pretende-se tentar reduzir a lacuna existente entre o conhecimento teórico e a prática, preparando os alunos para desafios reais do setor elétrico. Dessa forma, este material pode ser uma ferramenta valiosa para cursos de engenharia elétrica, contribuindo para uma aprendizagem mais dinâmica, participativa e alinhada com as necessidades do mercado de trabalho.

Palavras-chave: conversão de energia, ensino prático, experimentos, máquinas elétricas, transformadores.

ABSTRACT

The training of an electrical engineer requires a balance between theory and practice. However, traditional education often focuses solely on theoretical concepts, making it difficult to grasp fundamental topics such as electric energy conversion, transformers, and electric machines. In light of this reality, this work presents a set of detailed experimental guides to support the practical learning of these essential concepts. The experiments cover everything from basic electricity principles to more complex applications, such as the operation of generators, motors, and three-phase transformers. Each guide is designed to intuitively lead the student, offering clear explanations, illustrations, and diagrams that facilitate the execution of the activities. Additionally, the material includes detailed instructions on the equipment used and safety procedures, ensuring that the laboratory experience is both efficient and safe. The purpose of this work goes beyond simply presenting experiments. It aims to stimulate critical thinking and problem-solving skills in students, encouraging them to understand not only how electrical systems operate but also why they function the way they do. In doing so, it seeks to bridge the gap between theoretical knowledge and practical application, preparing students for real-world challenges in the electrical sector. Therefore, this material can be a valuable tool for electrical engineering courses, contributing to a more dynamic, hands-on learning experience that aligns with the needs of the job market.

Keywords: energy conversion, electrical machines, experiments, practical learning, transformers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Demonstração da defasagem angular em diferentes condições de cargas.	6
Figura 2.2 – a) Gerador de campo rotativo trifásico de onda senoidal trifásica (o rotor é mostrado como um ímã permanente). A figura b) mostra a saída do gerador.	7
Figura 2.3 – Defasagem angular da tensão em relação a corrente.	7
Figura 2.4 – Representação das tensões em um sistema trifásico.	8
Figura 2.5 – Triângulo das potências.	9
Figura 2.6 – Comportamento das formas de onda de tensão (V), corrente (I) e potência instantânea (P) em um sistema monofásico.	10
Figura 2.7 – Comparativo das potências com o copo de chopp.	11
Figura 2.8 – Ligação no método estrela.	12
Figura 2.9 – Ligação no método triângulo.	13
Figura 3.1 – Exemplificação da Lei de Faraday.	16
Figura 3.2 – Diagrama de conexão para o experimento.	17
Figura 3.3 – Influência do campo magnético em uma bússola.	18
Figura 3.4 – Exemplificação da lei de Lenz.	20
Figura 3.5 – Exemplificação da regra da mão direita.	21
Figura 3.6 – Estrutura de uma usina hidroelétrica.	24
Figura 3.7 – Turbina Francis.	25
Figura 3.8 – Turbina Francis ligada ao gerador.	25
Figura 3.9 – Turbina Kaplan.	26
Figura 3.10 – Turbina Pelton.	26
Figura 3.11 – Bobinas do rotor de um gerador síncrono de uma usina PGH.	27
Figura 3.12 – Unidade de sincronismo DLB 11105.	29
Figura 3.13 – Alimentação da bancada.	29
Figura 3.14 – Sistema de alimentação auxiliar.	30
Figura 3.15 – Bancada de Geração Hídrica Pelton.	30
Figura 4.1 – Ligação de transformadores monofásicos na configuração estrela.	37
Figura 4.2 – Ligação de transformadores monofásicos na configuração estrela.	37
Figura 4.3 – Experimento realizado em sala de aula.	38
Figura 4.4 – Transformador utilizado nos experimentos.	39
Figura 4.5 – Ligação do primário em estrela dos transformadores.	39
Figura 4.6 – Esquema de ligação estrela-estrela dos transformadores.	40
Figura 4.7 – Esquema de ligação estrela – triângulo dos transformadores.	41
Figura 4.8 – Esquema de ligação estrela - triângulo dos transformadores.	41
Figura 4.9 – Ligação estrela-estrela para a medição das tensões.	42

Figura 4.10–Resultado da experimentação da ligação estrela-estrela prática.	43
Figura 4.11–Resultados após aterramento do varivolt na rede.	44
Figura 4.12–Ligação estrela-triângulo para a medição das tensões.	44
Figura 4.13–Diagrama de ligação para ensaio em curto-circuito.	46
Figura 4.14–Modelo de um transformador	47
Figura 4.15–Modelo de um transformador no ensaio de curto-circuito	48
Figura 4.16–Modelo equivalente a um transformador real	49
Figura 4.17–Transformador utilizado nos experimentos.	50
Figura 4.18–Diagrama de ligação para ensaio em curto-circuito.	51
Figura 4.19–Diagrama de conexão para o ensaio a vazio.	54
Figura 4.20–Modelo simplificado de um transformador para ensaio a vazio.	55
Figura 4.21–Transformador utilizado nos testes.	57
Figura 4.22–Diagrama de ligação para ensaio a vazio.	57
Figura 5.1 – Classificação dos motores elétricos de corrente contínua (CC).	61
Figura 5.2 – Classificação dos motores elétricos de corrente alternada (CA).	62
Figura 5.3 – Vista explodida de uma máquina CC.	63
Figura 5.4 – Exemplo de um mancal de rolamento.	64
Figura 5.5 – Enrolamento de campo (estator) da máquina.	65
Figura 5.6 – Escova da máquina de corrente contínua.	66
Figura 5.7 – Exemplo de um comutador de corrente contínua.	67
Figura 5.8 – Simulação de um gerador de corrente contínua	67
Figura 5.9 – Simulação de um gerador com o comutador.	68
Figura 5.10–Armadura (rotor) da armadura da máquina CC.	69
Figura 5.11–Gerador síncrono acoplado um motor de corrente contínua.	77
Figura 5.12–Diagrama esquemático de montagem do motor de corrente contínua. . .	78
Figura 5.13–Diagrama de ligação do motor de corrente contínua.	78
Figura 5.14–Diagrama de ligação do gerador síncrono.	79
Figura 5.15–Curva característica da partida direta.	85
Figura 5.16–Módulo contator.	86
Figura 5.17–Módulo de relé de proteção.	87
Figura 5.18–Módulo de botão com chaves NA e NF.	87
Figura 5.19–Módulo de sinalização.	88
Figura 5.20–Ligação do motor a rede elétrica.	89
Figura 5.21–Ligação do motor por meio do contator.	90
Figura 5.22–Adição dos botões ao diagrama de comando.	90
Figura 5.23–Adição do comando selo no circuito.	91
Figura 5.24–Circuito básico com motor desligado.	92
Figura 5.25–Circuito básico com motor ligado.	92
Figura 5.26–Adição dos relés térmicos.	93

Figura 5.27–Diagrama com sistema de potência, controle e sinalização.	93
Figura 5.28–Diagrama do circuito de partida direta.	96
Figura 5.29–Adição do contator K2.	96
Figura 5.30–Adição do botão para reversão.	97
Figura 5.31–Diagrama com selo com intertravamento.	98
Figura 5.32–Simulação do circuito com motor desligado.	98
Figura 5.33–Simulação com motor no sentido anti horário.	99
Figura 5.34–Simulação com motor no sentido horário.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros do ensaio de curto-circuito do transformador.	51
Tabela 4.2 – Parâmetros do ensaio a vazio do transformador.	58
Tabela 5.2 – Principais parâmetros de um motor elétrico	82

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1	INTRODUÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Estrutura do Trabalho	2
2	INTRODUÇÃO AO SISTEMA TRIFÁSICO	4
2.1	APRESENTAÇÃO	4
2.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS	5
2.3	PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA	5
2.4	MÉTODOS DE LIGAÇÃO	11
2.5	CONCLUSÃO	13
3	CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	14
3.1	APRESENTAÇÃO	14
3.2	EXPERIMENTO 01 - LEI DE FARADAY	15
3.3	EXPERIMENTO 02 - LEI DE LENZ	19
3.4	EXPERIMENTO 03 - HIDROGERAÇÃO	23
3.5	CONCLUSÃO	32
4	TRANSFORMADORES	33
4.1	APRESENTAÇÃO	33
4.2	ASPECTOS FÍSICOS E FUNCIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES	34
4.3	EXPERIMENTO 04 - LIGAÇÃO TRIFÁSICA DE TRANSFORMADORES	35
4.4	EXPERIMENTO 05 - ENSAIO DE TRANSFORMADORES EM CURTO-CIRCUITO	45

4.5	EXPERIMENTO 06 - ENSAIO DE TRANSFORMADORES Á VAZIO	53
4.6	CONCLUSÃO	59
5	MÁQUINAS ELÉTRICAS	60
5.1	APRESENTAÇÃO	60
5.2	CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS	61
5.3	MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA	62
5.4	EXPERIMENTO 07 - MÁQUINA C.C. COMO MOTOR	70
5.5	EXPERIMENTO 08 - MOTOR C.C. ACOPLADO A UM GERADOR SÍNCRONO	74
5.6	MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA	80
5.7	EXPERIMENTO 9 – PARTIDA DIRETA DE MOTORES TRIFÁSICOS	83
5.8	EXPERIMENTO 10 – PARTIDA DE MOTOR TRIFÁSICO COM REVERSÃO	94
5.9	CONCLUSÃO	100
6	CONCLUSÃO	101

1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 INTRODUÇÃO

A educação universitária desempenha um papel importante na preparação de profissionais capacitados ao oferecer aos alunos a oportunidade de se familiarizarem com as atividades que enfrentarão no mercado de trabalho pela primeira vez. É essencial estabelecer uma ligação sólida entre a teoria e a prática para fortalecer o processo de aprendizagem e assegurar uma formação abrangente e compatível com as exigências do mundo profissional.

Na literatura educacional tem sido muito discutida a importância da conexão entre teoria e prática no ensino de engenharia. Como apontado por Souza et al.[1], a combinação de aulas teóricas com atividades práticas é essencial para promover o progresso dos estudantes ao possibilitar uma compreensão mais profunda dos temas abordados. Estudos realizados por Bueno e outros pesquisadores [2] também destacam o papel importante das atividades de laboratório na assimilação de conceitos complexos e na melhoria da eficiência do aprendizado.

É importante adotar uma aproximação prática no ensino de engenharia como ressaltado por Kolb [3], que apresentou o conceito de aprendizado experiencial evidenciando que a aprendizagem é mais eficiente quando os alunos percorrem um ciclo envolvendo experiência prática realista, reflexão crítica, princípios teóricos e experimentação ativa. Wankat e Oreovicz [4] também salientam que metodologias ativas, como aulas práticas, incentivam a participação dos estudantes e contribuem para o desenvolvimento de habilidades analíticas e solução de problemas.

No âmbito da engenharia elétrica e suas diversas vertentes, como Conversão de Energia Elétrica, Transformadores e Máquinas Elétricas, é necessário um método de ensino que vá além do conteúdo teórico padrão. De acordo com Feisel e Rosa [5], a utilização de laboratórios no processo de ensino da engenharia é essencial para que os alunos possam desenvolver suas habilidades técnicas e adquirir experiência prática em experimentação e na análise de dados obtidos durante esses experimentos. Contudo, a ausência de materiais didáticos modernos e bem estruturados para a realização desses experimentos práticos pode comprometer a qualidade do aprendizado ao dificultar a conexão entre a teoria abordada em sala de aula e sua aplicação real.

Neste contexto, este estudo tem como principal objetivo fornecer um recurso educativo bem estruturado, contendo instruções detalhadas para experimentos que exploram

conceitos fundamentais da conversão de energia elétrica, transformadores e máquinas elétricas. Os experimentos apresentados foram desenvolvidos e aplicados ao longo do curso sob a orientação do orientador, sendo agora escritos neste material didático para facilitar a replicação e o aprendizado prático. O conteúdo inclui figuras ilustrativas, simulações e esquemas elucidativos, permitindo que os alunos realizem os experimentos de forma guiada e interativa, contribuindo para uma abordagem mais dinâmica e alinhada às exigências do setor elétrico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver roteiros de experimentos de laboratório elétrico, abordando conceitos de forma clara e sucinta, com roteiros experimentais detalhados e atividades complementares. Com o intuito de complementar o aprendizado e a compreensão dos conceitos de conversão de energia elétrica, transformadores e máquinas elétricas, promovendo o desenvolvimento de habilidades práticas com a execução de experimentos.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar os objetivos propostos, será necessário:

- Descrever os princípios físicos e as leis que regem o funcionamento dos sistemas (conversão de energia, transformadores e máquinas elétricas);
- Estruturar os roteiros de experimentos, utilizando instruções detalhadas, ilustrações e diagramas que corroborem com a compreensão do tema da seção.
- Propor atividades complementares que estimulem a reflexão crítica e o desenvolvimento de habilidades de resolução de problemas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado de maneira lógica e progressiva para facilitar a compreensão dos conceitos abordados. Ele está dividido em seis capítulos, que combinam teoria e prática para ajudar no aprendizado sobre conversão de energia elétrica, transformadores e máquinas elétricas.

O **Capítulo 1 – Apresentação do Trabalho** introduz o tema e explica a importância de unir teoria e prática no ensino de engenharia elétrica. Aqui também estão

os objetivos do trabalho e um panorama sobre sua relevância tanto no meio acadêmico quanto no mercado de trabalho.

No **Capítulo 2 – Introdução ao Sistema Trifásico**, são apresentados os conceitos fundamentais desse sistema, que é amplamente utilizado na geração, transmissão e distribuição de energia. São explicadas suas principais características, os parâmetros que influenciam seu funcionamento e os diferentes tipos de ligação.

O **Capítulo 3 – Conversão de Energia Elétrica** explora como a energia elétrica é gerada e transformada para ser utilizada no nosso dia a dia. Para tornar esse aprendizado mais prático, são apresentados experimentos baseados na Lei de Faraday e na Lei de Lenz, além de um estudo sobre geração hidroelétrica, mostrando como esse conhecimento se aplica na realidade.

No **Capítulo 4 – Transformadores**, o foco é entender como os transformadores funcionam e por que são essenciais para os sistemas elétricos. O capítulo traz explicações sobre suas características físicas e operacionais, além de experimentos que mostram, na prática, como ocorrem processos como ligação trifásica e ensaios de curto-circuito e a vazio.

Já o **Capítulo 5 – Máquinas Elétricas** apresenta o funcionamento dos motores e geradores elétricos, essenciais para a indústria e para muitas aplicações do nosso cotidiano. O capítulo traz uma visão geral sobre máquinas de corrente contínua e corrente alternada, além de experimentos que demonstram o funcionamento de motores trifásicos e suas formas de partida e reversão.

Por fim, o **Capítulo 6 – Conclusão** traz um resumo do que foi abordado no trabalho, reforçando a importância da prática para complementar a teoria no ensino da engenharia elétrica. Também são discutidos desafios enfrentados durante o desenvolvimento do estudo e sugestões para aprimoramentos futuros, tanto para o ensino quanto para novas pesquisas na área.

Essa organização foi pensada para tornar o estudo mais dinâmico e acessível, garantindo que o aprendizado aconteça de forma natural e aplicado à realidade do setor elétrico.

Para que as atividades práticas ocorram de forma segura, é fundamental seguir as orientações de segurança. Durante as práticas, todos devem utilizar equipamentos de proteção individual (EPIs), como luvas isolantes, óculos de proteção e calçados adequados, além de garantir que todas as instalações estejam desenergizadas e sinalizadas adequadamente antes do início dos experimentos, a fim de evitar acidentes graves.

2 INTRODUÇÃO AO SISTEMA TRIFÁSICO

Motivação

O sistema trifásico exerce um papel fundamental na geração, transmissão e distribuição de energia, garantindo maior eficiência e estabilidade. Compreender os princípios básicos desse sistema permite dimensionar redes elétricas e equipamentos industriais com segurança. Este estudo explora seus conceitos fundamentais, incluindo defasagem angular, tensões de linha e fase, potências elétricas e métodos de ligação.

2.1 APRESENTAÇÃO

O uso da energia elétrica está presente em praticamente todas as atividades do nosso cotidiano, desde dispositivos simples até processos industriais complexos. No entanto, para que essa energia possa ser gerada, transportada e utilizada de maneira eficiente, é necessário compreender como ocorre a conversão entre diferentes formas de energia. Esse conhecimento é essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias e para a otimização dos sistemas elétricos.

No capítulo anterior, foram abordados os fundamentos do sistema trifásico, que desempenha um papel crucial na geração e distribuição de energia elétrica. Esse conceito é fundamental para a conversão de energia, pois a maioria dos geradores e transformadores utilizados no setor elétrico opera em corrente alternada trifásica. Assim, a compreensão das grandezas elétricas, defasagens e métodos de ligação discutidos anteriormente será essencial para o entendimento dos fenômenos abordados neste capítulo.

Aqui, exploraremos os princípios do eletromagnetismo que governam a conversão de energia, com foco na Lei de Faraday e na Lei de Lenz, que explicam como a energia mecânica pode ser transformada em energia elétrica e vice-versa. Além disso, apresentaremos experimentos práticos que demonstram a influência da excitação do gerador, da alimentação do motor e da carga aplicada no desempenho dos sistemas elétricos.

A abordagem prática deste capítulo permitirá visualizar como esses conceitos teóricos se aplicam a situações reais, facilitando a compreensão do funcionamento de geradores e motores elétricos. Esse conhecimento será essencial para os próximos capítulos, nos quais aprofundaremos o estudo dos transformadores (Capítulo 4) e das máquinas elétricas (Capítulo 5), elementos fundamentais para a conversão e aplicação da energia elétrica nos mais diversos setores.

Dessa forma, este capítulo não apenas apresentará os fundamentos da conversão de energia, mas também proporcionará uma base sólida para o estudo dos dispositivos elétricos que dependem desse processo, preparando o leitor para desafios técnicos e aplicações práticas no setor elétrico.

2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

No final do século XIX, Nikola Tesla e George Westinghouse desempenharam papéis importantes na consolidação da importância da corrente alternada (CA), superando desafios técnicos e comerciais durante o famoso conflito conhecido como “Guerra das Correntes” [6]. Este sistema se destacou pela eficiência na transmissão de energia a longas distâncias e pela facilidade de transformação de tensão com o uso de transformadores, características que permanecem fundamentais até os dias atuais [7]. Desde então, a CA evoluiu significativamente, incorporando tecnologias mais avançadas em usinas hidrelétricas, termelétricas, nucleares e eólicas, onde turbinas conectadas a geradores produzem a forma de onda senoidal característica [8].

A padronização da frequência, geralmente de 50 Hz ou 60 Hz, possibilita a inversão da polaridade da tensão diversas vezes por segundo. Essa característica reduz perdas nas linhas de transmissão e facilita o uso de transformadores para elevar a tensão no transporte de energia e reduzi-la nas aplicações residenciais e industriais [9]. A geração em larga escala adota frequentemente o sistema trifásico, em que três correntes alternadas de mesma frequência e amplitude são defasadas em 120 graus. Este arranjo assegura o equilíbrio das cargas em cada fase, diminuindo perdas energéticas e garantindo maior estabilidade, aspectos cruciais para a confiabilidade das redes elétricas [10].

Embora o sistema de corrente alternada simplifique o funcionamento de motores de indução e outros dispositivos, ele requer atenção à qualidade da energia fornecida. A integração de equipamentos eletrônicos pode introduzir distorções na forma de onda, tornando necessário o uso de filtros e o controle de harmônicas para preservar a estabilidade do sistema [11]. Apesar desses desafios, a corrente alternada permanece como a base das redes elétricas em todo o mundo, destacando-se por sua robustez e excelente relação custo-benefício [12].

2.3 PARÂMETROS DE UM SISTEMA DE CORRENTE ALTERNADA

Para compreender melhor o sistema elétrico, é fundamental ter conhecimento sobre alguns de seus principais parâmetros técnicos essenciais para seu funcionamento adequado. Um desses parâmetros importantes é o ângulo de defasagem, que revela como

se relacionam tensão elétrica e corrente em um sistema específico. Além disso, é relevante levar em conta as diversas formas de tensão presentes no sistema, como tensão de fase ou tensão de linha. Também é crucial analisarmos as diferentes potências envolvidas - ativa, reativa, juntamente com aparentemente -, uma vez que elas têm impactos diretos na eficiência operacional, na estabilidade da distribuição de energia elétrica, bem como no consumo global do fornecimento energético [13]. Compreender essas ideias ajuda a adequar adequadamente os equipamentos elétricos e as redes elétricas para garantir um uso mais seguro e eficiente da eletricidade em diversas áreas de atuação, como indústrias comerciais [14].

• DEFASAGEM ANGULAR

A defasagem angular é a diferença de fase entre duas grandezas senoidais, como tensão e corrente, em um sistema elétrico. No caso de cargas puramente resistivas, tensão e corrente estão em fase, ou seja, a defasagem angular é 0° . No entanto, em cargas indutivas ou capacitivas, ocorre um atraso ou avanço da corrente em relação à tensão, respectivamente, resultando em uma defasagem angular diferente de zero [9], como mostrado na figura 2.1.

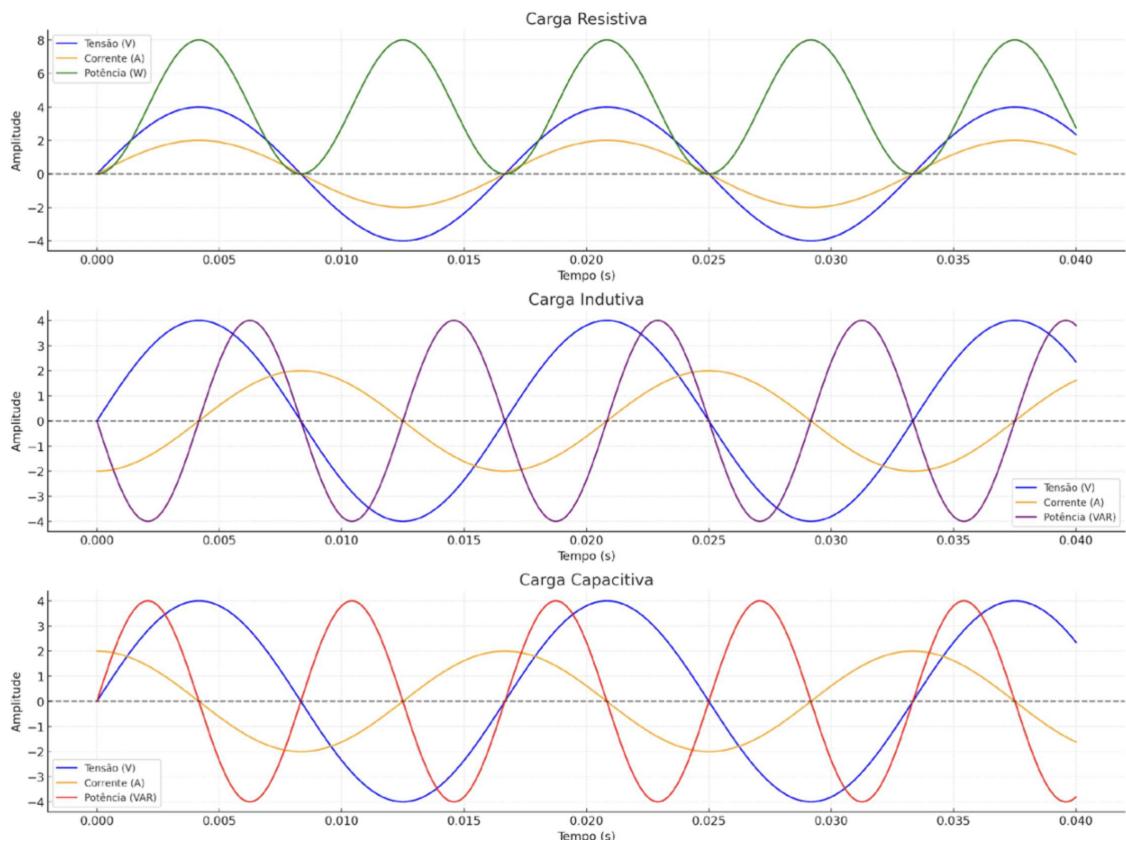


Figura 2.1 – Demonstração da defasagem angular em diferentes condições de cargas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A figura 2.2 mostra a defasagem entre as fases (Fase 1, Fase 2 e Fase 3) de 120° gerada um gerador rotativo trifásico, garantindo uma onda senoidal trifásica. Essa separação uniforme garante o equilíbrio e a eficiência na distribuição da energia elétrica.

A figura 2.3 mostra a defasagem angular entre a tensão e a corrente e a curva das potências devido à defasagem angular.

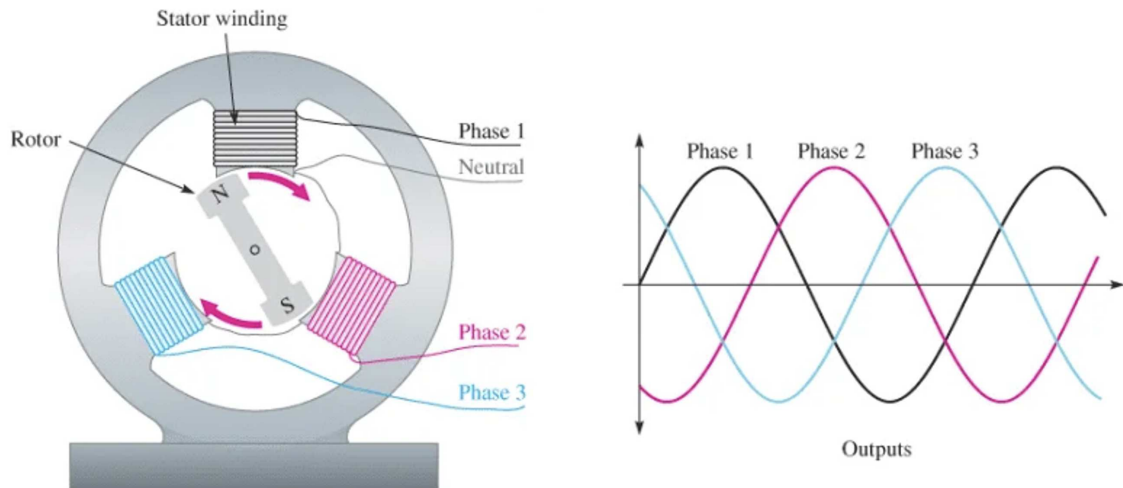


Figura 2.2 – a) Gerador de campo rotativo trifásico de onda senoidal trifásica (o rotor é mostrado como um ímã permanente). A figura b) mostra a saída do gerador.

Fonte: [11].

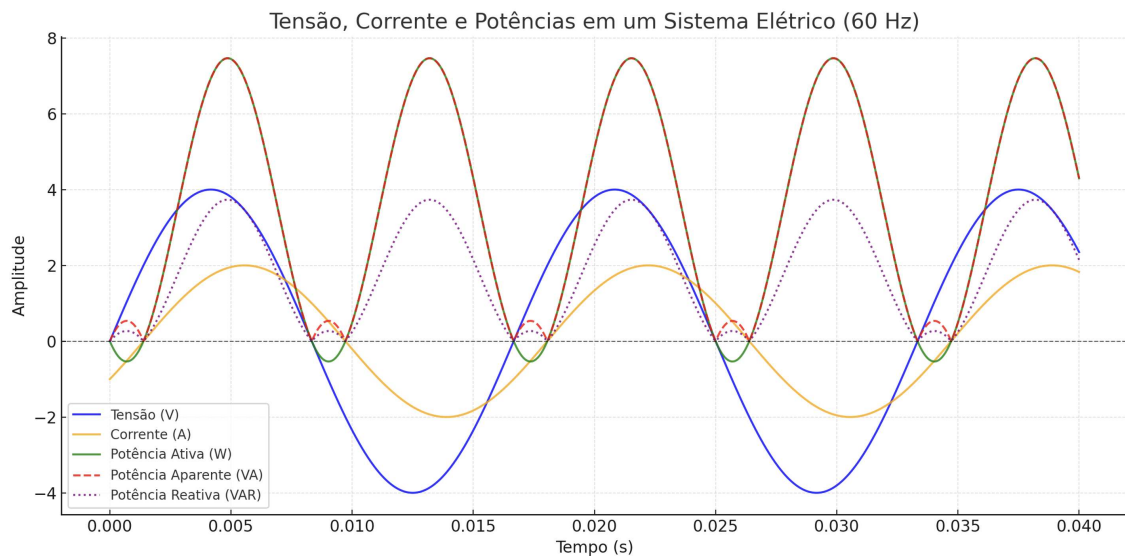


Figura 2.3 – Defasagem angular da tensão em relação a corrente.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

• TENSÃO DE LINHA E TENSÃO DE FASE

A tensão elétrica é uma das grandezas fundamentais da eletricidade, sendo definida como a diferença de potencial elétrico entre dois pontos de um circuito e medida em volts (V). Em sistemas trifásicos, há duas categorias de tensão: a tensão de linha (também chamada de fase-fase) e a tensão de fase (fase-neutro), mostrada na figura 2.4. Na configuração trifásica, essas tensões apresentam uma relação matemática importante, ilustrada em vários estudos clássicos da engenharia elétrica [7].



Figura 2.4 – Representação das tensões em um sistema trifásico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em instalações de grande porte, como fábricas e edifícios comerciais, as tensões de linha mais altas são frequentemente utilizadas para alimentar motores trifásicos e equipamentos de alto consumo de energia. Por outro lado, nas aplicações residenciais, a tensão de fase (fase - neutro) é mais adequada para alimentar dispositivos com menor demanda de energia [10].

A tensão de linha (entre duas fases quaisquer) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_{\text{Linha}} = V_{\text{Fase}} \cdot \sqrt{3} \quad (2.1)$$

Enquanto a tensão de fase, a tensão aferida entre uma fase em relação ao neutro, pode ser descrita pela seguinte equação:

$$V_{\text{Fase}} = \frac{V_{\text{Linha}}}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

• POTÊNCIAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Em sistemas trifásicos, a análise da potência elétrica é realizada considerando três componentes: potência ativa (P), potência reativa (Q) e potência aparente (S). A potência ativa, medida em watts (W), representa a energia convertida em trabalho útil, como o acionamento de máquinas ou a geração de calor. A potência reativa, expressa em volt-ampères reativos (Var), representa a energia que oscila entre a fonte e componentes indutivos ou capacitivos do sistema, sem ser transformada em trabalho. E por último, a potência aparente, medida em volt-ampères (VA), representa a combinação vetorial das outras duas e corresponde à potência total fornecida ao sistema [6].

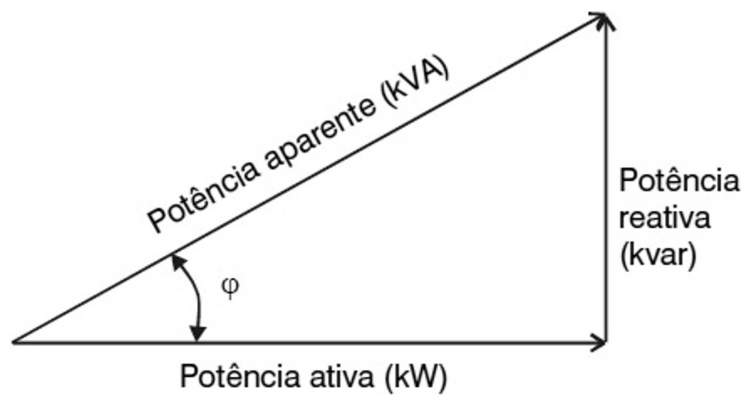


Figura 2.5 – Triângulo das potências.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A relação entre essas três grandezas é frequentemente representada pelo triângulo de potências, onde a potência aparente (S) é a hipotenusa, a potência ativa (P) é o cateto adjacente ao ângulo de defasagem (φ), e a potência reativa (Q) é o cateto oposto. O fator de potência ($\cos \varphi$), obtido pela equação 2.3, é a razão entre a potência ativa e a potência aparente, sendo um dos principais parâmetros analisados no desempenho de sistemas elétricos industriais e comerciais [11].

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

Para sistemas trifásicos, as expressões para o cálculo das potências podem ser simplificadas. Para um sistema monofásico, com tensões de linha (V_F) e correntes de linha (I_F), a potência ativa (P) é dada por:

$$P = V_F I_F \cos \varphi \quad (2.4)$$

Onde o $(\cos\varphi)$ é o fator de potência, e representa a defasagem angular entre a tensão e a corrente. A figura 2.3.6 mostra o comportamento da potência com a variação da tensão e da corrente ao longo do tempo.

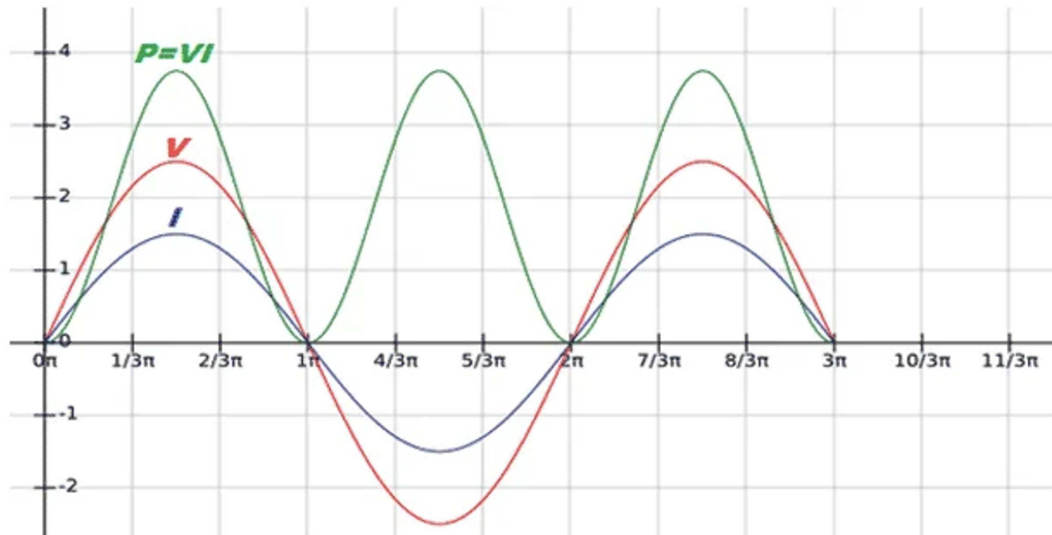


Figura 2.6 – Comportamento das formas de onda de tensão (V), corrente (I) e potência instantânea (P) em um sistema monofásico.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A potência reativa é a parte da energia elétrica que não realiza trabalho útil diretamente, mas ainda assim necessária para o funcionamento de dispositivos que dependem de campos eletromagnéticos, como motores, transformadores e outros equipamentos com campos indutivos ou capacitivos. A potência reativa (Q) é calculada por:

$$Q = V_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \quad (2.5)$$

A potência aparente (S) é o resultado da soma vetorial das potências ativas (P) e da potência reativa (Q) fornecida ao sistema elétrico. Ela pode ser calculada seguindo a relação:

$$S = V_L \cdot I_L \quad (2.6)$$

Mas também pode ser encontrada pela soma vetorial da potência ativa e da potência reativa, seguindo a relação:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.7)$$

Comumente, as potências são comparadas a um copo de chopp, como na figura 2.7, onde o líquido corresponde à potência ativa (W), representando a energia útil que realiza trabalho, enquanto a espuma simboliza a potência reativa (Var), que não realiza trabalho diretamente, mas é indispensável para o funcionamento do sistema. O copo completo, contendo tanto o líquido quanto a espuma, representa a potência aparente (VA), que é a soma vetorial das duas componentes. Quanto menor a espuma (menor potência reativa), maior a proporção de líquido aproveitado (maior eficiência do sistema), o que equivale a um fator de potência elevado ($\cos \varphi$ próximo de 1), garantindo melhor uso da energia fornecida.

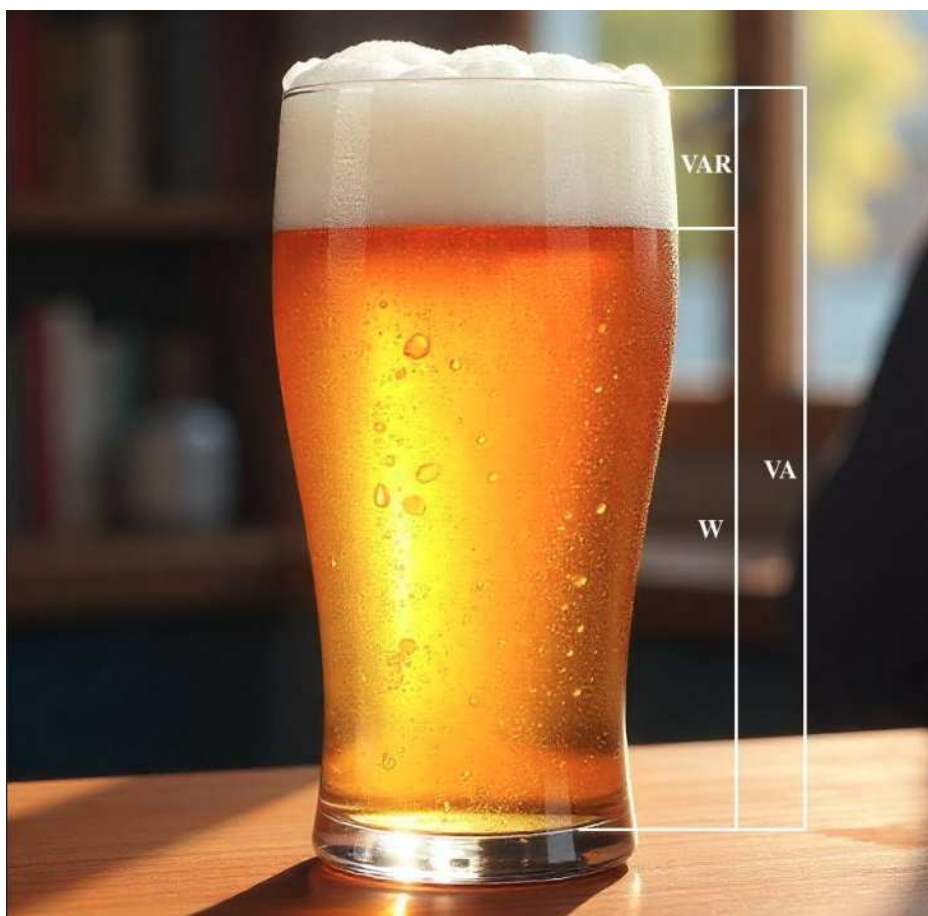


Figura 2.7 – Comparativo das potências com o copo de chopp.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.4 MÉTODOS DE LIGAÇÃO

No sistema trifásico, as ligações estrela (Y) e triângulo (Δ) são formas distintas de interligar os enrolamentos de geradores, transformadores e motores. Cada método de ligação possui configuração própria de tensão e corrente, onde a escolha dependerá do tipo de aplicação onde será aplicado [8].

• ESTRELA (Y)

Na ligação em estrela, cada enrolamento é conectado a um ponto comum, originando um barramento central que serve como neutro (N), como mostrado na figura 2.8. Assim, o circuito passa a contar com um ponto de referência para medir a tensão de fase, definida como a diferença de potencial entre uma das fases (R , S ou T) e o neutro (N). Já a tensão de linha, por sua vez, é a diferença de potencial entre duas fases, como RS , ST ou TR . Essa configuração é muito utilizada em redes de distribuição, pois fornece tanto tensões monofásicas (fase-neutro) quanto tensões trifásicas (fase-fase) para diferentes tipos de cargas [13].

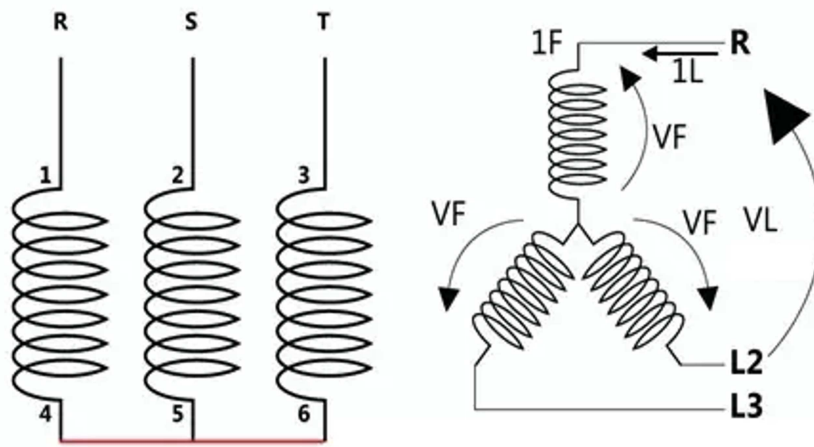


Figura 2.8 – Ligação no método estrela.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Uma característica dessa configuração é a relação entre as duas grandezas de tensão: a tensão de linha (V_{Linha}) e a tensão de fase (V_{Fase}), conforme mostrado na equação 2.8.

$$V_{\text{Linha}} = \sqrt{3} \cdot V_{\text{Fase}} \quad (2.8)$$

• TRIÂNGULO (Δ)

Na ligação em triângulo, cada enrolamento é conectado em série com outro, formando um circuito fechado em formato de triângulo. Ao contrário da configuração em estrela, nesta topologia não há ponto neutro, pois as três fases são interligadas diretamente entre si. Essa ligação é particularmente comum em motores de alta potência e transformadores industriais, por não haver a necessidade de fornecer um ponto de neutro (fase-neutro) [14]. A figura 2.9 demonstra o esquema de ligação.

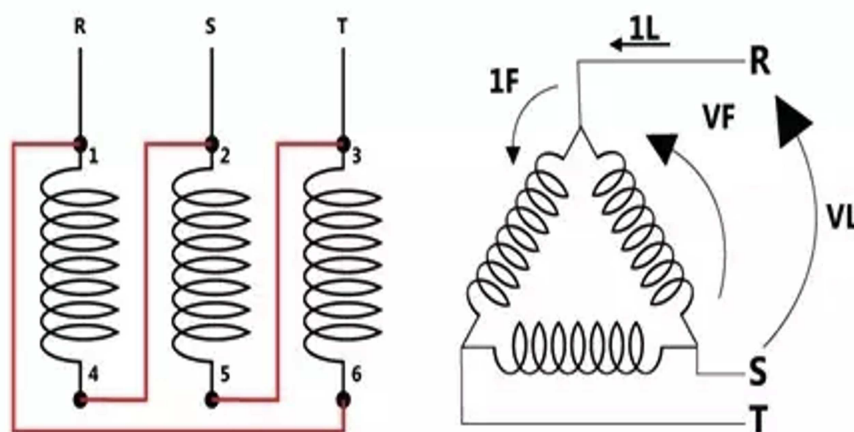


Figura 2.9 – Ligação no método triângulo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.5 CONCLUSÃO

O sistema trifásico é a base da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, proporcionando maior eficiência e estabilidade em comparação com sistemas monofásicos. Compreender seus fundamentos, como defasagem angular, tensões de linha e fase, além dos diferentes métodos de ligação, é essencial para a análise e dimensionamento de circuitos elétricos em diversas aplicações industriais e comerciais.

Além de sua relevância teórica, o entendimento do sistema trifásico serve como um alicerce fundamental para os próximos capítulos deste trabalho. No Capítulo 3, esse conhecimento será aplicado à conversão de energia elétrica, demonstrando como a energia é gerada e transformada para diferentes usos. No Capítulo 4, os conceitos de sistemas trifásicos são fundamentais para a compreensão do funcionamento dos transformadores, que operam com diferentes configurações de ligação para atender às necessidades do sistema elétrico. Já no Capítulo 5, o estudo das máquinas elétricas dependerá diretamente da base teórica apresentada aqui, uma vez que motores e geradores trifásicos são amplamente utilizados na indústria e exigem um entendimento sólido dos princípios abordados neste capítulo.

Dessa forma, o estudo do sistema trifásico não apenas permite uma compreensão aprofundada da eletricidade aplicada, mas também prepara o caminho para a assimilação dos experimentos práticos e análises realizadas nos capítulos seguintes, conectando teoria e prática para um aprendizado mais completo e estruturado.

3 CONVERSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Motivação

A conversão de energia elétrica é essencial para o funcionamento de sistemas modernos, permitindo transformar diferentes formas de energia em eletricidade. Compreender esses processos é fundamental para o desenvolvimento de soluções eficientes e sustentáveis, desde a geração em usinas até o uso cotidiano em motores, geradores e dispositivos eletromagnéticos.

3.1 APRESENTAÇÃO

A energia elétrica é essencial em diversas aplicações, desde pequenos dispositivos até grandes operações industriais. Compreender sua conversão entre diferentes formas de energia é fundamental para avanços tecnológicos. No Capítulo 2, foi abordado o sistema trifásico, base da geração e distribuição de energia. Como a maioria dos sistemas industriais opera em corrente alternada trifásica, esse conhecimento é fundamental para a conversão eficiente de energia, tema central deste capítulo, que explora os princípios do eletromagnetismo e sua aplicação na transformação da eletricidade.

Neste capítulo, vamos analisar os princípios da transformação de energia, desde noções elementares até aplicações mais sofisticadas. Será apresentado os fundamentos do eletromagnetismo, incluindo a lei de Faraday e a lei de Lenz, que explicam os fenômenos por trás da geração e conversão de eletricidade, essenciais para o funcionamento de geradores e motores elétricos.

Além da teoria, este capítulo traz uma abordagem prática, com experimentos que demonstram a aplicação dos conceitos de conversão de energia em geradores e motores. Essas atividades permitirão visualizar como a teoria se traduz em situações reais, aproximando o aprendizado da prática profissional. Além disso, servem de base para os próximos capítulos, onde no Capítulo 4 exploraremos os transformadores, essenciais para a adequação dos níveis de tensão, e no Capítulo 5 aprofundaremos o estudo das máquinas elétricas, como motores e geradores, que dependem diretamente dos princípios abordados aqui.

Dessa forma, este capítulo não apenas apresentará os fundamentos da conversão de energia, mas também permitirá uma compreensão mais intuitiva e dinâmica do tema, garantindo uma base sólida para os estudos posteriores e preparando o leitor para desafios técnicos no setor elétrico.

3.2 EXPERIMENTO 01 - LEI DE FARADAY

Motivação

A Lei de Faraday é um dos princípios fundamentais da engenharia elétrica, sendo essencial para o funcionamento de geradores, transformadores e motores elétricos. Compreender a relação entre campo magnético e corrente elétrica permite visualizar, de forma prática, como a eletricidade é gerada e utilizada em diversas aplicações tecnológicas e industriais.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

Este experimento visa demonstrar a Lei de Faraday, evidenciando como a variação do campo magnético induz corrente elétrica em um circuito. Para isso, será montado um circuito que, ao ser acionado, permitirá observar o efeito do campo magnético gerado sobre uma bússola. A corrente elétrica será controlada por um interruptor, possibilitando analisar a relação entre variações no fluxo magnético e a resposta do sistema. Além disso, discutir como diferentes configurações, como a variação no número de espiras da bobina e a tensão aplicada, podem influenciar o fenômeno da indução eletromagnética.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 3 Pilhas de 1,5V ou 01 Fonte de alimentação
- 3 Alojamentos de pilhas de 1,5V
- 1 Interruptor simples NA
- 1 Bobina de fio de cobre (20 - 70 espiras, 28 - 20 AWG)
- 1 Bússola
- Malha de ferro
- Jumpers para conexão

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Lei da Indução Eletromagnética, descoberta em 1831 pelo físico inglês Michael Faraday, descreve uns dos princípios fundamentais da engenharia elétrica e para os processos

de conversão de energia. De forma simplificada, essa lei descreve como a variação de um campo magnético pode induzir uma corrente elétrica em um circuito [15].

O conceito dessa lei estabelece que, sempre que ocorre uma alteração no fluxo magnético que atravessa um circuito, é gerada uma tensão elétrica nesse circuito. Essa tensão, denominada força eletromotriz (FEM), pode ser expressa matematicamente pela equação:

$$\mathcal{E} = \pm \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

onde ε representa a tensão induzida e Φ é o fluxo magnético [10], que corresponde à quantidade de campo magnético que atravessa o circuito. O sinal $\pm$ indica o sentido da corrente gerada, conforme determinado pela Lei de Lenz, a qual estabelece que a corrente elétrica gerada atua de modo a se opor à variação do fluxo magnético que a originou [12].

Para ilustrar essa lei, pode-se considerar o seguinte exemplo: imagine um ímã em forma de barra e uma bobina composta por fios condutores enrolados em espiral, conforme a figura 3.1. Quando o ímã é aproximado da bobina, o fluxo magnético que atravessa a bobina aumenta, gerando uma corrente elétrica no fio. Caso o ímã seja afastado, o fluxo magnético diminui, mas uma corrente será novamente gerada – desta vez, em sentido oposto. Por outro lado, se o ímã permanecer estático em relação à bobina, não haverá variação no fluxo magnético, resultando na ausência de corrente elétrica, conforme ilustrado na figura 3.1 lado direito.

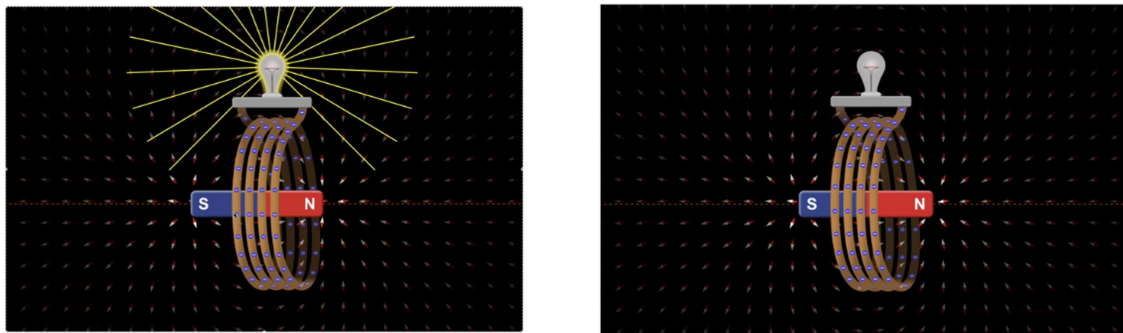


Figura 3.1 – Exemplificação da Lei de Faraday.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esse princípio não se restringe ao âmbito teórico, sendo amplamente aplicado em dispositivos utilizados cotidianamente. Um exemplo notável é a geração de energia elétrica em usinas [16]. Nas usinas, as turbinas em movimento deslocam ímãs próximos a bobinas de fio condutor, provocando uma variação constante no fluxo magnético. Essa variação é a

responsável pela geração de eletricidade. Contudo, se os ímãs permanecessem imóveis, não haveria alteração no fluxo magnético, impossibilitando a produção de energia elétrica.

Outro exemplo prático é o carregador de celular, que utiliza um transformador. Este dispositivo, baseado no princípio da indução eletromagnética, reduz a tensão elétrica da tomada para um nível seguro, adequado ao carregamento da bateria do aparelho.

Em síntese, a lei da indução eletromagnética desempenha um papel importante no funcionamento de geradores, transformadores e motores elétricos e dispositivos que se tornaram indispensáveis em diversas atividades cotidianas.

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

Para realização do experimento, as pilhas foram conectadas em série utilizando os alojamentos. Com essa configuração, a tensão total é de 4,5 V, que será utilizada como fonte de energia do circuito.

Em seguida, as bobinas foram ligadas aos terminais da fonte de energia, incluindo um interruptor em série no circuito, seguindo o diagrama da figura 3.2. O interruptor será utilizado para controlar a alimentação elétrica, permitindo ligar e desligar o circuito de forma prática, além de possibilitar a observação das variações no campo magnético.

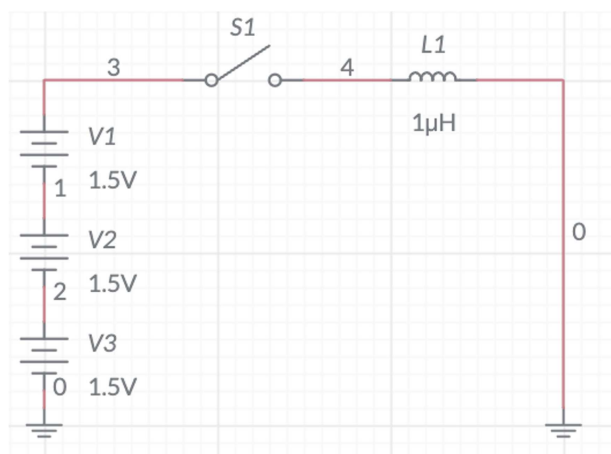


Figura 3.2 – Diagrama de conexão para o experimento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para visualizar o efeito gerado pelo campo magnético da bobina, a bússola foi posicionada próxima à bobina. Quando a corrente elétrica passa pela bobina, um campo magnético é criado ao seu redor. Esse campo interage com a bússola, desviando o ponteiro.

A deflexão do ponteiro é uma evidência prática do campo magnético gerado pela corrente elétrica.

Ao fechar o interruptor, a corrente elétrica flui pela bobina e o campo magnético gerado começa a influenciar a bússola, como mostrado na figura 3.3. O movimento do ponteiro da bússola é uma resposta direta à força magnética presente, demonstrando a interação entre a corrente elétrica e o campo magnético. Quando o interruptor é repetidamente aberto e fechado, o campo magnético varia e a bússola reage a essas mudanças. Esse comportamento evidencia o princípio da Lei de Faraday, que relaciona a variação do fluxo magnético à indução de efeitos magnéticos.

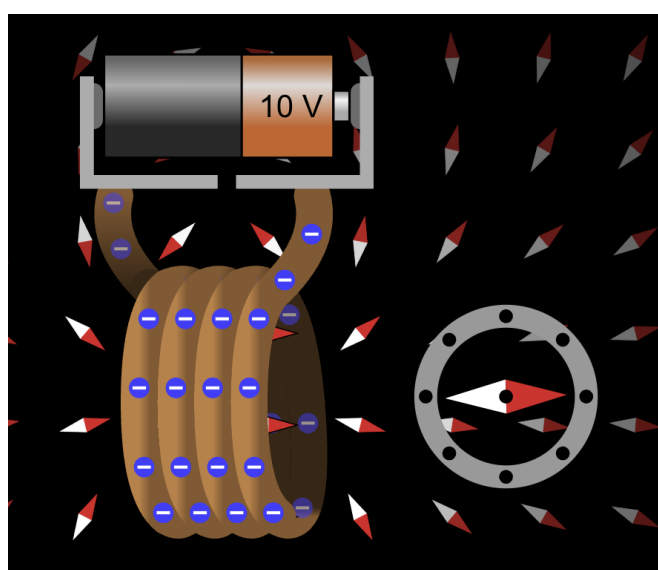


Figura 3.3 – Influência do campo magnético em uma bússola.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Adicionalmente, se possível, modificar o número de voltas da bobina ou conectar em uma fonte variável de tensão também pode mostrar como essas variáveis influenciam o comportamento do campo magnético e da corrente induzida.

Este procedimento não apenas demonstra o princípio da Lei de Faraday, mas também fornece uma base clara para compreender a relação entre corrente elétrica, campo magnético e indução eletromagnética. Essa abordagem torna o fenômeno acessível e reforça sua relevância em aplicações práticas no campo do eletromagnetismo.

3.3 EXPERIMENTO 02 - LEI DE LENZ

Motivação

A Lei de Lenz é fundamental para entender a indução eletromagnética e o princípio da conservação de energia. Esse fenômeno tem ampla utilização em diversas aplicações, como em geradores, transformadores e sistemas de frenagem magnética. Este experimento demonstra, de forma prática, como a variação do fluxo magnético induz correntes elétricas que geram forças opostas ao movimento, permitindo a visualização desse efeito.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é demonstrar a Lei de Lenz, mostrando como a variação do fluxo magnético em um condutor induz correntes elétricas que geram um campo magnético oposto ao movimento. Para isso, será analisada a queda de um ímã dentro de tubos com diferentes composições, verificando o comportamento do ímã com cada um dos materiais. Medindo o tempo de queda, será possível comparar os efeitos da indução eletromagnética, compreendendo sua aplicação em freios magnéticos, transformadores e sistemas de levitação eletromagnética.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 1 Tubo de alumínio (com diâmetro interno maior que o do ímã)
- 1 Tubo de plástico ou outro material não condutor
- 1 Ímã forte (de preferência um ímã de neodímio)
- 1 Moeda
- Cronômetro

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Lei de Lenz complementa diretamente a Lei de Faraday ao determinar o sentido da corrente elétrica induzida em um circuito. Enquanto a Lei de Faraday estabelece que a variação de um campo magnético gera uma tensão elétrica, a Lei de Lenz explica que a corrente elétrica induzida se manifesta sempre no sentido de se opor à variação do fluxo magnético que a originou [6][11]. Essa oposição garante a preservação do princípio da conservação de energia no sistema. Matematicamente, essa relação é expressa pelo sinal negativo presente na equação de Faraday:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.2)$$

O sinal negativo indica que o campo magnético gerado pela corrente induzida atua no sentido de neutralizar a variação do fluxo magnético. Assim, a Lei de Lenz assegura o equilíbrio no sistema, impedindo que a variação do fluxo magnético se amplifique descontroladamente.

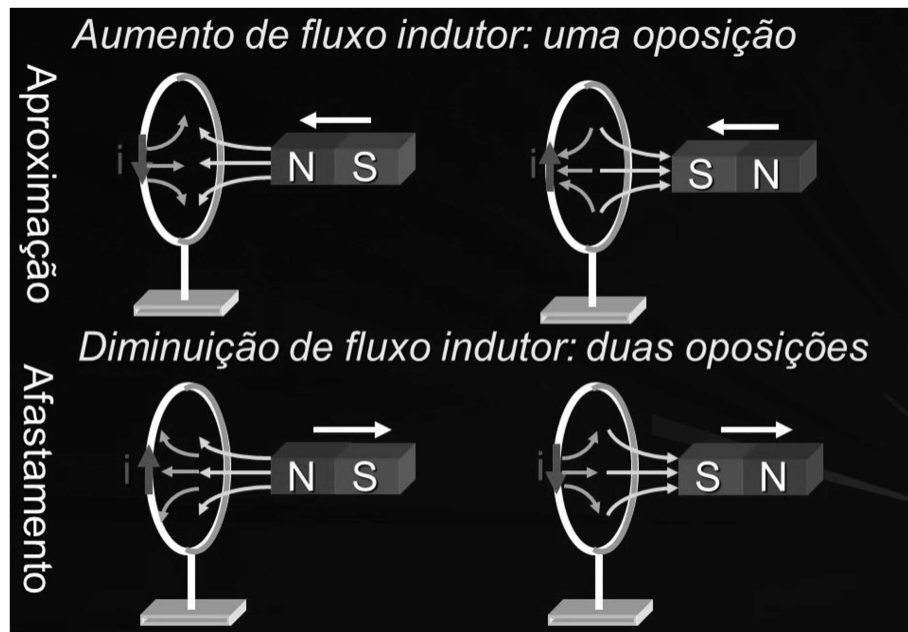


Figura 3.4 – Exemplificação da lei de Lenz.

Fonte: Autor desconhecido.

Considere o exemplo da figura 3.5, ao aproximar um ímã de uma bobina. Durante a aproximação, ocorre um aumento no fluxo magnético através da bobina. A corrente elétrica induzida cria um campo magnético oposto ao movimento do ímã, produzindo um polo norte voltado para o ímã, de modo a repelir seu movimento.

Quando o ímã é afastado da bobina, o fluxo magnético diminui. Nesse caso, a corrente elétrica induzida cria um campo magnético com um polo sul voltado para o ímã, tentando atrair o ímã e minimizar a variação do fluxo magnético.

Esses exemplos ilustram como a Lei de Lenz regula o comportamento da corrente elétrica induzida em resposta às alterações no fluxo magnético, promovendo o equilíbrio dinâmico do sistema.

Regra da Mão Direita

A lei de Lenz pode ser aplicada de maneira prática utilizando a Regra da Mão Direita, que facilita a identificação do sentido da corrente elétrica induzida. A aplicação dessa regra ocorre seguindo a figura 3.6, onde:

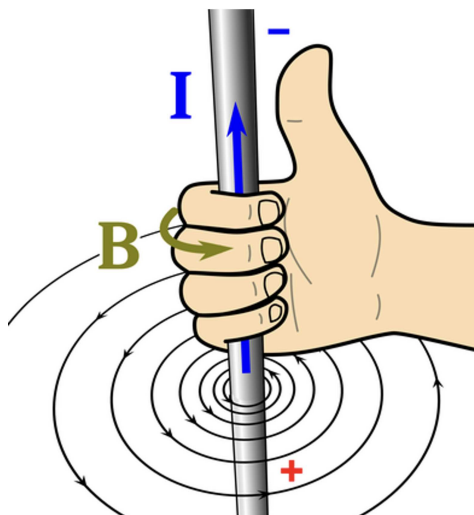


Figura 3.5 – Exemplificação da regra da mão direita.

Fonte: Autor desconhecido.

- O polegar indica aponta na direção da corrente elétrica;
- O restante dos dedos envoltos na barra, determinam o sentido do campo gerado.

A Lei de Lenz, assim como a Lei de Faraday, é essencial para o funcionamento de diversos dispositivos eletromagnéticos, tais como geradores, transformadores, motores elétricos, freios magnéticos e levitação magnética [13]. Em geradores elétricos, por exemplo, a variação do fluxo magnético induz correntes que produzem a energia elétrica utilizada em inúmeras aplicações. A Lei de Lenz assegura que esse processo ocorra de forma eficiente e equilibrada, respeitando o princípio da conservação de energia.

De forma simplificada e explicativa, podemos entender que a Lei de Lenz atua como um obstáculo natural contra mudanças no campo magnético para manter o sistema em equilíbrio controlado de maneira intrínseca e necessária para explorações na área da indução eletromagnética e para aplicação em projetos práticos no campo da engenharia elétrica.

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

Este teste ilustrativo mostra a aplicação da lei de Lenz através do uso de um ímã caindo em um tubo de alumínio para demonstrar o princípio da indução de corrente, evidenciando como uma mudança no fluxo magnético em um condutor produz correntes que geram um campo magnético contrário à fonte dessa mudança.

Como primeiro experimento, posicionamos o tubo de plástico verticalmente, garantindo que ele esteja limpo e sem obstruções. Soltando a moeda pela extremidade superior do tubo é possível observar que a mesma desce livremente, com aceleração constante, devido à gravidade. Isso ocorre porque o plástico não é um material condutor e, portanto, não há interação eletromagnética entre a moeda e o tubo.

Para o próximo passo, substituindo a moeda pelo ímã, repetiu o procedimento. Assim como no caso anterior, o ímã cai livremente, com aceleração próxima à da gravidade. Isso acontece porque, embora o ímã possua um campo magnético próprio, o plástico não é capaz de conduzir eletricidade ou interagir com esse campo. Dessa forma, não há geração de correntes induzidas e forças que resistam ao movimento do ímã, permitindo sua queda sem interferências.

O próximo caso é a substituição do tubo de plástico pelo tubo de alumínio, um material condutor. Soltando a moeda pela extremidade superior do tubo e observando seu comportamento, percebe-se que, assim como no tubo de plástico, a moeda cai livremente, sem qualquer desaceleração adicional. Isso ocorre porque a moeda não possui um campo magnético significativo para interagir com o tubo condutor. Assim, o alumínio não gera correntes induzidas em resposta ao movimento da moeda, resultando em uma queda sem interferências.

Por último, repetindo o procedimento utilizando o ímã, diferentemente do que ocorreu com a moeda, o ímã não desce livremente. Durante a queda, o movimento do ímã é desacelerado, como se ele estivesse sendo "freado" enquanto passa pelo tubo. Esse comportamento é explicado pela indução de correntes elétricas no alumínio, as correntes de Foucault. À medida que o ímã cai, seu campo magnético variável gera uma mudança no fluxo magnético nas paredes do tubo condutor. Essa variação induz correntes no material, e essas correntes, por sua vez, criam um campo magnético oposto ao movimento do ímã, conforme descrito pela Lei de Lenz. Esse campo magnético oposto age como uma força resistiva, diminuindo a aceleração do ímã e tornando sua descida visivelmente mais lenta.

Este experimento, além de ilustrar a Lei de Lenz, mostra aplicações práticas como nos freios magnéticos e em sistemas de levitação, destacando a relevância desse fenômeno no contexto do eletromagnetismo.

3.4 EXPERIMENTO 03 - HIDROGERAÇÃO

Motivação

A eficiência energética é um fator essencial para o aproveitamento sustentável dos recursos naturais, especialmente na geração de energia hidráulica. Esse experimento permite analisar, de forma prática, como a conversão de energia potencial da água em eletricidade ocorre e quais fatores influenciam a eficiência do processo. Compreender esse conceito é fundamental para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais eficientes e sustentáveis, sendo aplicado no dimensionamento de pequenas centrais hidrelétricas.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é analisar a eficiência energética na conversão de energia hidráulica em elétrica. Para isso, serão medidas a pressão da água, a vazão do sistema e a potência elétrica gerada, permitindo calcular a energia hidráulica disponível e a eficiência do sistema. Utilizando um multímetro, serão registradas a corrente e a tensão para determinar a potência elétrica. A eficiência será obtida comparando a energia elétrica gerada com a energia hidráulica disponível. Espera-se que os resultados estejam dentro da faixa típica de 80% a 90%, possibilitando a análise dos fatores que influenciam o desempenho do sistema.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Unidade de Sincronismo
- Bancada de Geração Hídrica Pelton (De Lorenzo)
- 180 Litros de água
- Módulo de Cargas AC / DC – 12 V;

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Usinas hidrelétricas são amplamente empregadas na produção de energia em todo o mundo devido à sua eficiência e viabilidade econômica, construídas em lugares estratégicos com fluxo e queda de água adequados para garantir uma produção estável e rentável. Entre os exemplos mais comuns está a Usina de Três Gargantas, na China, conhecida como a maior do mundo em capacidade de armazenamento. Na América do Sul, temos outro grande exemplo, a usina de Itaipu, localizada na fronteira entre Brasil e

Paraguai, onde desempenha um papel essencial no suprimento de energia para ambos os países. Ainda no Brasil, outro grande exemplo é a recém-construída usina de Belo Monte, no rio Xingu, e a de Tucuruí, no rio Tocantins. Essas são exemplos de usinas com grande relevância, que se caracterizam por uma forte dependência da fonte hidráulica.

O funcionamento das hidrelétricas baseia-se no aproveitamento da energia potencial armazenada na água represada por barragens. Ao ser liberada e percorrer condutos até as turbinas, a água adquire energia cinética que movimenta essas estruturas. As turbinas, por sua vez, transferem energia mecânica para os geradores, que a convertem em energia elétrica com eficiência superior a 90% [9]. Apesar de sua alta eficiência, as hidrelétricas podem causar impactos ambientais e sociais significativos, como o alagamento de áreas, deslocamento de comunidades e alterações nos ecossistemas locais. Em contrapartida, essas usinas são fundamentais para a estabilidade do sistema elétrico, reduzindo oscilações de frequência e assegurando um fornecimento confiável de energia.

Para gerar energia, uma hidrelétrica necessita inicialmente de uma barragem para formar um reservatório, elevando o nível da água e aumentando sua energia potencial. Essa água percorre condutos forçados até atingir as turbinas localizadas na casa de força, como demonstrado na figura 3.7. O movimento das turbinas é transmitido a um gerador, onde o rotor cria um campo magnético variável. Esse campo induz correntes alternadas no estator, gerando eletricidade [6] [8] [9]. Posteriormente, a energia elétrica passa por transformadores que elevam a tensão para níveis adequados à transmissão e distribuição [17].

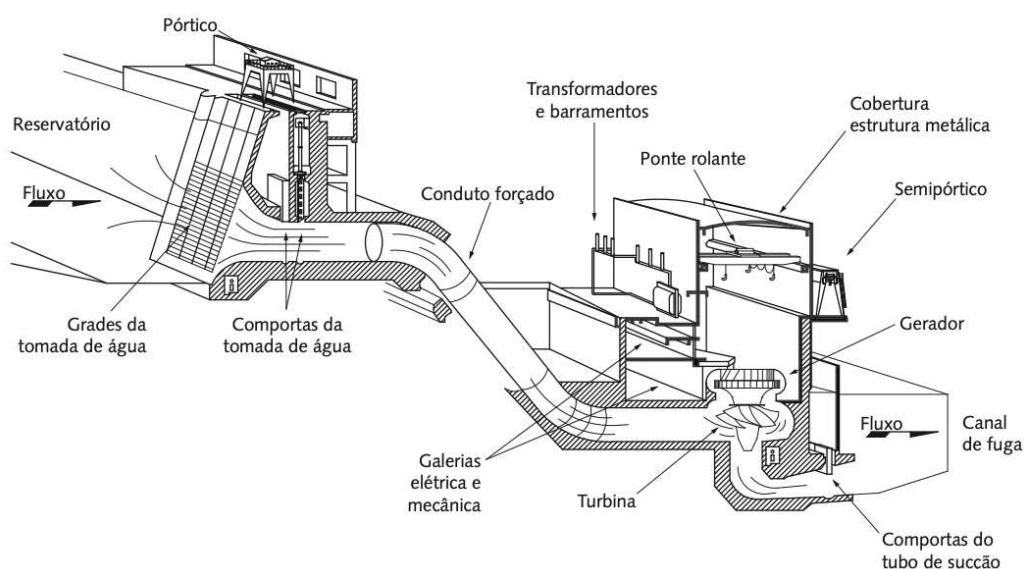


Figura 3.6 – Estrutura de uma usina hidroelétrica.

Fonte: [18].

As turbinas usadas nas usinas hidrelétricas variam conforme a altura da queda d'água e do fluxo do rio em questão. A turbina Francis é ilustrada nas Figuras 3.8 e 3.9 e é amplamente utilizada em usinas de grande porte por sua eficiência em médias a altas quedas d'água [11][13][16][18]. Já a turbina Kaplan - apresentada na figura 3.10 - é mais indicada para quedas menores e maior volume de água devido às suas pás ajustáveis conforme o volume e fluxo do rio [11][13][16][18]. A turbina Pelton é ideal para quedas de grande altura e baixo volume de água; ela funciona por meio de jatos d'água direcionados para girar suas conchas rotativas conforme mostrado na figura 3.11 [11][13][16][18].

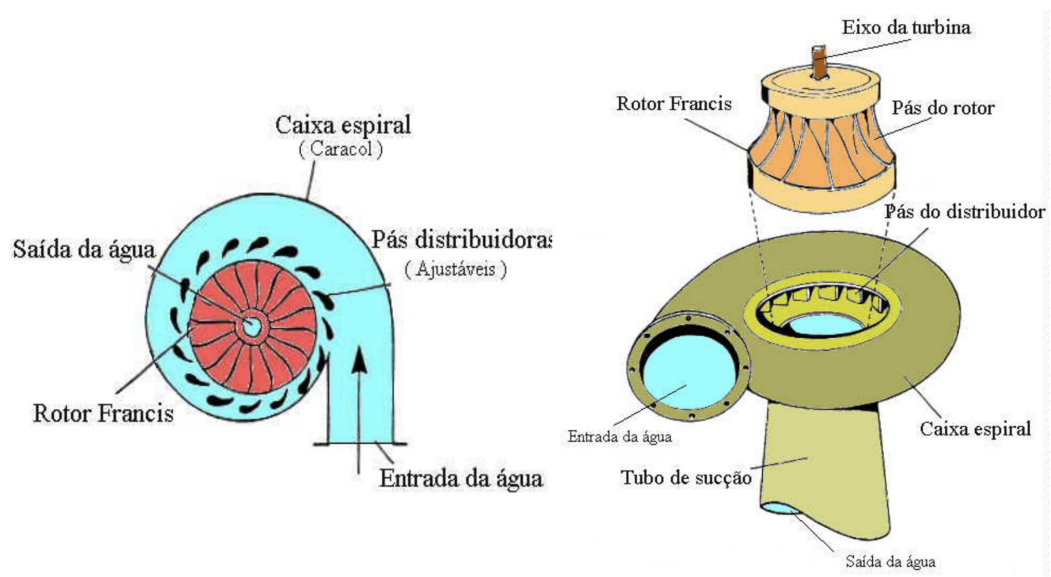


Figura 3.7 – Turbina Francis.

Fonte: [18].



Figura 3.8 – Turbina Francis ligada ao gerador.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

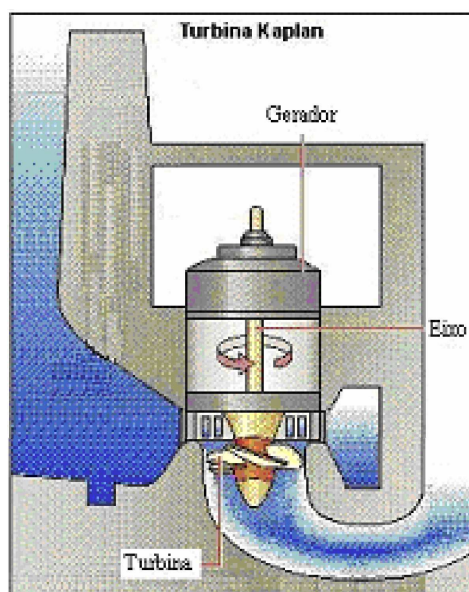


Figura 3.9 – Turbina Kaplan.

Fonte: [18].

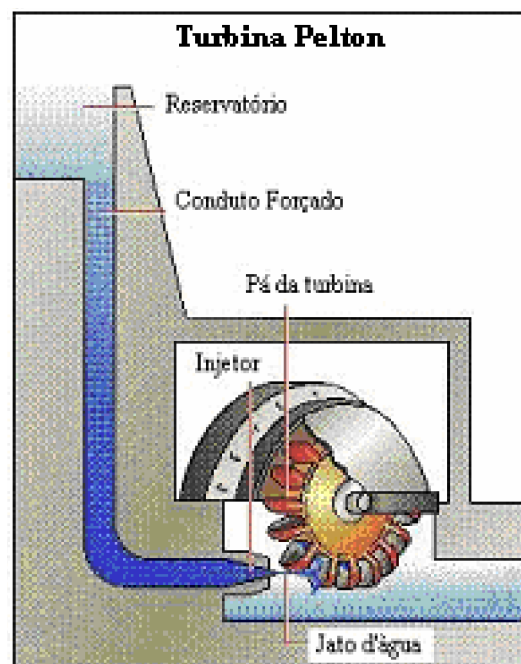


Figura 3.10 – Turbina Pelton.

Fonte: [18].

Os geradores utilizados nas usinas hidrelétricas funcionam com base em princípios fundamentais do eletromagnetismo, lei de Faraday e Lenz. Como visto anteriormente, a variação do fluxo magnético em uma espira ou bobina é capaz de induzir uma corrente elétrica no estator devido ao campo magnético do rotor [15]. No gerador, essa dinâmica

ocorre por meio do rotor, a parte móvel da máquina, que possui bobinas alimentadas por corrente contínua, demonstrado na figura 3.12. Essas bobinas criam polos magnéticos que, ao girarem, geram um campo magnético variável sobre o estator, a parte fixa do gerador. Esse movimento induz correntes alternadas trifásicas nas bobinas do estator, permitindo a geração de energia elétrica de maneira eficiente [6][11][13][16].



Figura 3.11 – Bobinas do rotor de um gerador síncrono de uma usina PGH.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Quando o gerador é conectado à carga elétrica, há um aumento na demanda de corrente no sistema. Esse aumento causa um campo magnético oposto no estator, conforme a Lei de Lenz, como visto anteriormente. A lei afirma que o campo gerado por uma corrente induzida sempre se opõe à variação do fluxo magnético que a causou [6]. Essa interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor cria uma resistência ao movimento do rotor, resultando em uma pequena diminuição em sua velocidade. Para evitar problemas de instabilidade ao operar com uma frequência constante de 60 Hz no Brasil, o controle da turbina ajustará automaticamente o fluxo de água necessário para garantir que haja força mecânica adequada no rotor para compensar o aumento de energia exigido pela carga elétrica [9].

Manusear com precisão o nível de eletricidade produzido é crucial para o bom desempenho das usinas hidrelétricas. Também é essencial garantir que a eletricidade seja controlada da forma adequada através do sistema de excitação, que regula o fluxo da corrente contínua aplicada ao rotor. Quaisquer mudanças nesse fluxo podem influenciar diretamente a intensidade do campo magnético criado e, consequentemente, impactar a tensão gerada no estator [16].

Nas usinas hidrelétricas, um dispositivo automático de controle de tensão é

responsável por gerenciar o processo de excitação, monitorando constantemente os níveis de tensão do gerador e fazendo ajustes conforme necessário para manter a estabilidade da tensão, mesmo diante de variações na demanda elétrica [18]. Além disso, garantir que os geradores estejam sincronizados com a rede elétrica é outro aspecto crucial na operação desses sistemas. Para realizar uma integração eficiente, é essencial ajustar três aspectos fundamentais:

- Frequência: Deve estar em harmonia com a da rede elétrica correspondente;
- Tensão: Precisa estar adequada para evitar flutuações indesejadas;
- Fase: Deve estar sincronizada para evitar instabilidades no sistema [17].

Além disso, é essencial garantir que os campos magnéticos em transformadores e motores sejam mantidos adequadamente. Nos geradores, o sistema de excitação controla esse aspecto, ajustando o campo magnético do rotor segundo as exigências [8]. Quando certos equipamentos precisam de mais energia para manutenção dos campos magnéticos, a potência reativa é aumentada. Durante momentos de baixa demanda de energia elétrica, diminuir essa potência ajuda a prevenir sobrecargas nas linhas de transmissão e garante o bom funcionamento e eficiência do sistema na totalidade [13].

Resumidamente, o funcionamento de uma usina hidrelétrica combina conceitos teóricos fundamentais, como as Leis de Faraday e Lenz, e princípios do magnetismo, com soluções práticas de engenharia, incluindo sistemas de excitação e controle, sincronização e ajustes para variações na demanda energética. Essa combinação de tecnologias garante que as hidrelétricas continuem sendo uma das formas mais confiáveis e eficientes de geração de energia elétrica, desempenhando um papel essencial na matriz energética global [15].

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

Essa simulação procura entender o comportamento do gerador com e sem carga, utilizando a bancada de geração hídrica. O objetivo é avaliar a relação entre a rotação da turbina, a tensão gerada e a influência da carga no sistema de conversão de energia.

A unidade de sincronismo (DLB 11105 - figura 3.13) é responsável por fornecer a alimentação trifásica necessária para a operação das bancadas de geração, garantindo um fornecimento de energia estável e seguro para os experimentos. Para assegurar a segurança dos usuários, a unidade conta com um disjuntor geral e disjuntores específicos que protegem tanto o sistema quanto as alimentações auxiliares.

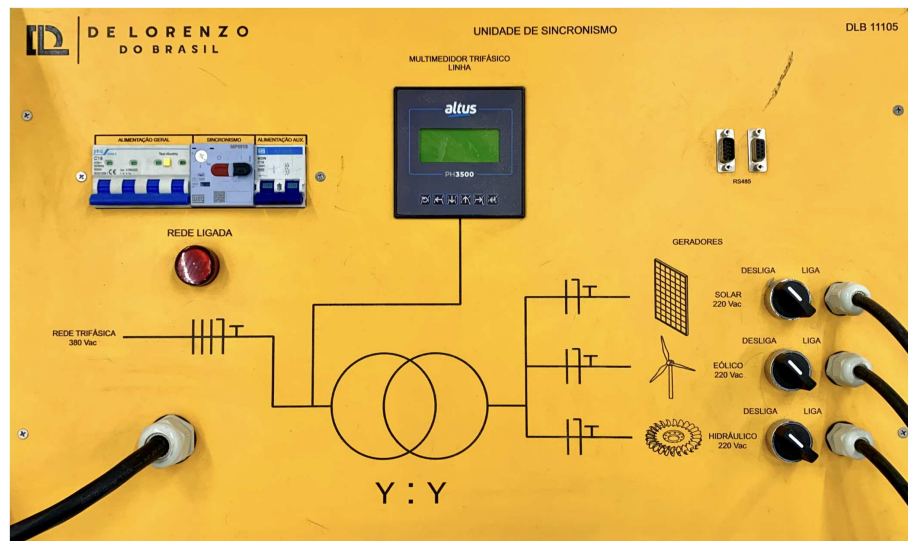


Figura 3.12 – Unidade de sincronismo DLB 11105.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A bancada é alimentada por meio de um conector trifásico industrial e possui três conexões monofásicas de 220 Vca, demonstrado na figura 3.14. A bancada também conta com três pontos de alimentação auxiliar localizados na lateral, mostrados na figura 3.15, que permitem a energização de módulos externos, como a Bancada de Geração Hídrica Pelton. A unidade de sincronismo integrada possibilita alinhar a energia gerada pelos sistemas com a rede elétrica do laboratório, simulando condições reais de operação. Além disso, conta com um multimedidor trifásico que monitora tensões, correntes e outras grandezas elétricas essenciais durante os experimentos.



Figura 3.13 – Alimentação da bancada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).



Figura 3.14 – Sistema de alimentação auxiliar.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Bancada de Geração Hídrica Pelton é um sistema didático projetado para reproduzir parte do processo de geração de energia elétrica a partir da água, como ocorre em uma usina hidrelétrica. Com capacidade para gerar até 28 Vcc, 830 W a 1492 RPM, a bancada tem como principal objetivo facilitar o aprendizado prático sobre a conversão de energia hidráulica em energia elétrica.

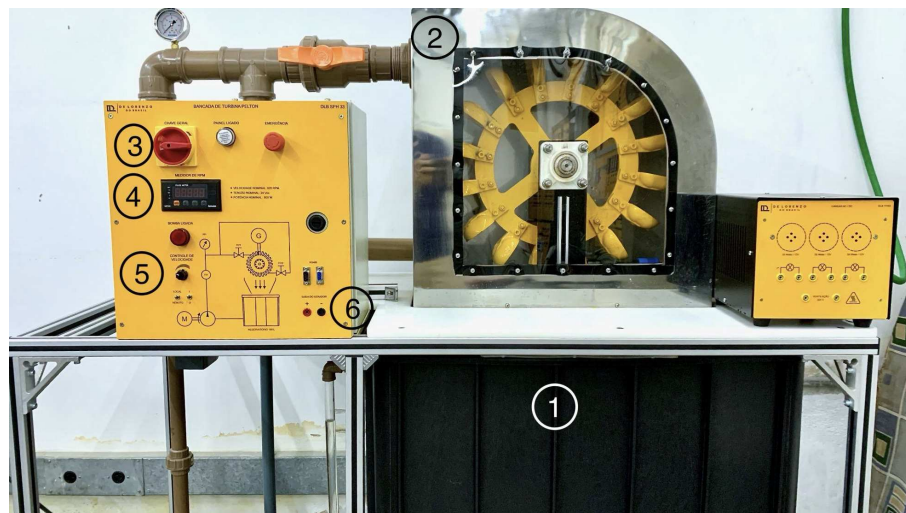


Figura 3.15 – Bancada de Geração Hídrica Pelton.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O sistema é composto por diversos elementos, mostrados na figura 3.16. O primeiro na figura é o reservatório de água, com capacidade aproximada de 190 litros, responsável por armazenar a água utilizada no processo. A recirculação da água é feita por uma bomba, cuja operação é controlada por um inversor de frequência, permitindo simular o

funcionamento de um rio ou barragem. Esse mecanismo pressuriza a água em direção à turbina, semelhante a uma usina hidrelétrica real.

Antes de iniciar o experimento, foi necessário garantir que o reservatório tivesse pelo menos 150 litros de água, conforme orientação do fabricante. Esse volume é necessário para manter o fluxo constante e assegurar o funcionamento da turbina. Além disso, a válvula de drenagem do reservatório foi mantida fechada para evitar vazamentos e garantir a pressão adequada no sistema.

Para ativar a bancada, os disjuntores dentro do painel de controle foram ligados, permitindo o funcionamento do inversor de frequência e da bomba hidráulica. O inversor utilizado para controlar a vazão de água e controlar consequentemente a velocidade da turbina através da bomba, pressurizando a água e direcionando a turbina, possibilitando a conversão da energia mecânica em energia elétrica.

No primeiro teste, o gerador foi acionado com a carga desconectada. A turbina começou a girar e sua velocidade foi gradualmente aumentada por meio do inversor de frequência. Em cada nível de rotação, a tensão gerada foi medida utilizando um voltímetro conectado à saída do gerador. Com esses dados, é possível criar um gráfico relacionando a rotação da turbina com a tensão gerada, permitindo analisar o comportamento do gerador sem interferências externas.

Sem carga conectada, a turbina acelerou rapidamente e atingiu o equilíbrio de rotação com facilidade. Isso ocorre porque não há uma resistência significativa no eixo do gerador. Toda a energia da água que movimenta a turbina se converte diretamente em energia mecânica, sem consumo elétrico relevante. Como não há corrente na saída, também não há um campo magnético contrário ao movimento, permitindo que a turbina atinja altas velocidades sem esforço.

Esse comportamento pode ser explicado pelas Leis de Faraday e Lenz, explicado anteriormente. Segundo a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético no gerador cria uma tensão elétrica, mas, sem carga conectada, essa tensão não gera corrente significativa. Lei de Lenz estabelece que a corrente induzida sempre cria um campo magnético que se opõe ao fluxo original [6][9][11]. Quando uma carga é conectada, a corrente gerada induz um campo magnético contrário à rotação da turbina, tornando o movimento mais difícil e exigindo maior torque para manter a rotação. Por isso, no experimento, a turbina demorou mais para atingir altas velocidades quando havia carga conectada, pois parte da energia disponível foi utilizada para alimentar a carga elétrica.

Na segunda etapa do experimento, cargas resistivas foram adicionadas progres-

sivamente ao gerador, simulando diferentes condições de operação. Lâmpadas halógenas foram utilizadas como carga, pois representam dispositivos que consomem energia de forma constante. Para cada configuração de carga, a velocidade da turbina foi ajustada em incrementos de 20% até alcançar o limite operacional. Durante esse experimento, é interessante registrar os valores de tensão e rotação da turbina, possibilitando realizar uma análise do impacto da carga no desempenho do gerador.

Com os resultados, será possível observar que, sem carga conectada, a tensão aumenta à medida que a rotação da turbina aumenta, estabilizando em altas velocidades devido às limitações do sistema e à saturação magnética do gerador. Com a carga aplicada, é possível observar uma redução tanto na tensão quanto na rotação, ao mesmo tempo, em que a corrente elétrica aumenta. Isso acontece porque, conforme mais carga é adicionada, o gerador precisa fornecer mais energia, o que exigia mais força da turbina e faz sua velocidade diminuir.

Além disso, é interessante notar que em velocidades mais baixas não havia energia suficiente para manter as lâmpadas brilhando no máximo de sua capacidade. Quando as velocidades se aproximaram do limite operacional, o sistema funcionou de maneira mais estável, garantindo um fornecimento contínuo e eficiente de energia. O experimento apresentado mostrou como carga, rotação e eficiência do gerador estão interligados possibilitando uma melhor compreensão sobre o processo de transformação de energia hidráulica em energia elétrica.

3.5 CONCLUSÃO

A conversão de energia elétrica é um processo fundamental para a operação de sistemas elétricos modernos, permitindo transformar diferentes formas de energia para aplicações diversas. Neste capítulo, foram apresentados os princípios básicos do eletromagnetismo desse processo, com destaque para as leis de Faraday e Lenz, que explicam a indução eletromagnética e sua influência na geração e no funcionamento de dispositivos elétricos. Os experimentos realizados demonstraram, de forma prática, como esses conceitos se aplicam ao funcionamento de motores e geradores.

Além de proporcionar uma compreensão mais intuitiva sobre a conversão de energia, este capítulo estabeleceu a base para o estudo dos transformadores, tema do próximo capítulo. Os transformadores desempenham um papel essencial na adaptação dos níveis de tensão para a transmissão e distribuição de energia, garantindo eficiência e segurança no fornecimento elétrico. Assim, a compreensão dos fenômenos apresentados aqui será fundamental para o entendimento de como esses dispositivos operam e conforme aplicados nos sistemas elétricos industriais e comerciais.

4 TRANSFORMADORES

Motivação

Transformadores são dispositivos essenciais no sistema de distribuição de energia elétrica, pois desempenham um papel fundamental na conversão de diferentes tensões presentes nas redes elétricas. Entender o seu funcionamento é crucial para garantir o uso eficiente da energia elétrica ao mesmo tempo, em que se reduzem as perdas e se aumenta a confiabilidade nos sistemas de energia. Esse estudo abre caminho para aplicar os princípios da indução magnética e dos circuitos magnéticos, na prática, contribuindo para o desenvolvimento de projetos elétricos mais seguros e eficientes.

4.1 APRESENTAÇÃO

Os transformadores desempenham um papel fundamental na transmissão e distribuição de energia elétrica, permitindo a adaptação dos níveis de tensão para garantir eficiência e segurança no fornecimento de eletricidade. No Capítulo 3, foram discutidos os princípios da conversão de energia elétrica e os fenômenos do eletromagnetismo que possibilitam o funcionamento de dispositivos essenciais, como geradores e motores. Esses conceitos são a base para o estudo dos transformadores, uma vez que seu funcionamento se apoia diretamente nos princípios da indução eletromagnética e da variação do fluxo magnético, conforme demonstrado nas Leis de Faraday e Lenz.

Neste capítulo, serão explorados os aspectos físicos dos transformadores, abordando seus principais componentes e princípios de funcionamento. Em seguida, serão apresentadas as principais configurações de ligação, como estrela e triângulo, discutindo suas aplicações em sistemas elétricos trifásicos e a relação entre tensão e corrente de linha e de fase em cada configuração. Além disso, este capítulo inclui testes práticos essenciais, como o teste a vazio e o teste de curto-circuito, que permitem avaliar o desempenho dos transformadores em diferentes condições operacionais.

A realização dos experimentos propostos permitirá observar na prática como os transformadores operam e influenciam o sistema elétrico. Cada atividade será acompanhada de instruções detalhadas e objetivos específicos, proporcionando uma compreensão do tema. O estudo dos transformadores é essencial para o Capítulo 5, onde será abordado o funcionamento das máquinas elétricas. Como motores e geradores precisam de níveis de tensão e corrente adequados para operar de forma eficiente, compreender o papel dos transformadores na conversão e distribuição da energia elétrica será fundamental

para analisar o desempenho desses equipamentos em diferentes aplicações industriais e comerciais.

4.2 ASPECTOS FÍSICOS E FUNCIONAMENTO DOS TRANSFORMADORES

Os transformadores são dispositivos eletromagnéticos utilizados na conversão de níveis de tensão de corrente alternada (CA), mas com a mesma frequência de saída [6][13]. Sua construção básica consiste em dois enrolamentos acoplados magneticamente por meio de um núcleo ferromagnético. O enrolamento primário é alimentado por uma fonte de energia CA, enquanto o secundário fornece o novo nível de tensão para carga. Em alguns casos, há um terceiro enrolamento que pode ser utilizado, denominado enrolamento terciário [19].

A transmissão de energia elétrica por corrente contínua apresenta grandes perdas por aquecimento e quedas de tensão ao longo da linha de transmissão. Por essa razão, a transmissão por corrente alternada é preferida em sistemas de potência, pois permite elevar a tensão e reduzir a corrente, minimizando as perdas [9][20].

Antes da eletrônica de potência, era inviável a utilização de corrente contínua para a transmissão de energia elétrica devido às grandes perdas por aquecimento e quedas de tensão ao longo da linha de transmissão. Por essa razão, dependendo da distância de transmissão, a corrente alternada era preferida. Com o uso dos transformadores é possível reduzir a bitola dos cabos e melhorar a eficiência do sistema, bastando elevar o nível da tensão de transmissão. Consequentemente, a corrente é reduzida, permitindo o uso de cabos de bitola menor [9][20].

Os transformadores são classificados de acordo com sua aplicação:

- **Transformadores elevadores:** aumentam a tensão da energia gerada (tipicamente entre 6 kV e 25 kV) para níveis superiores a 110 kV, sendo utilizados em usinas geradoras [8][18].
- **Transformadores abaixadores:** reduzem a tensão em subestações para níveis adequados à distribuição de energia (entre 2,3 kV e 34,5 kV) [16][21].
- **Transformadores de distribuição:** fornecem a energia elétrica em níveis de tensão apropriados para uso residencial e comercial (127 V, 220 V, etc.) [15].

Além desses, existem ainda outros dois transformadores utilizados para medição:

- **Transformadores de potencial:** utilizados para medir a tensão do sistema, ligados em paralelo à carga [7].
- **Transformadores de corrente:** medem a corrente do sistema, sendo conectados em série. Para evitar riscos, sua saída deve ser curto-circuitada quando não estiver em operação [3][6].

A estrutura do transformador é projetada de diferentes formas para otimizar sua eficiência. Os transformadores com núcleo de ferro são amplamente utilizados, principalmente na eletrônica, devido à sua alta permeabilidade magnética, o que reduz perdas por dispersão do fluxo magnético [19].

4.3 EXPERIMENTO 04 - LIGAÇÃO TRIFÁSICA DE TRANSFORMADORES

Motivação

Os transformadores trifásicos são fundamentais na transmissão de energia. Compreender suas conexões, como estrela e triângulo, é essencial para garantir eficiência e estabilidade nos sistemas elétricos. Este experimento permite a aplicação prática desses conceitos, analisando tensões, correntes e validando relações matemáticas.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é realizar e analisar a ligação de transformadores monofásicos em diferentes configurações, como triângulo e estrela. Primeiramente, serão realizados cálculos teóricos para prever os valores esperados na saída. Posteriormente, esses resultados serão comparados com os dados obtidos experimentalmente, de modo a verificar a compatibilidade entre teoria e prática. Ao final, é esperado que o experimento contribua na compreensão sobre as ligações dos transformadores e o comportamento de tensões e correntes em cada configuração.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Varivolt (0-250V, 0-5A mínimo)
- 03 transformadores (220V/12V)
- 03 Voltímetro
- Cabos para ligação

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os transformadores são dispositivos que podem realizar a elevação, ou abaixar, o nível de tensão inserida na entrada do transformador, desde que essa seja variável no tempo. O transformador é um dispositivo composto por dois ou mais enrolamentos, e essa conversão ocorre devido ao fluxo variável que passa pelas espiras, a do primário e secundário, conforme a equação abaixo:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = A \quad (4.1)$$

onde:

- $V_p(t)$ é a tensão no enrolamento primário do transformador;
- $V_s(t)$ é a tensão no enrolamento secundário do transformador;
- N_p é o número de espiras no enrolamento primário;
- N_s é o número de espiras no enrolamento secundário;
- A é a relação de transformação do transformador.

Esses dispositivos são comumente utilizados em sistemas nos quais o nível de tensão de entrada é diferente do valor desejado na saída, sendo capazes também de desempenhar outras funções, como isolamento elétrica entre circuitos (proteção contra descargas ou surtos elétricos), medição (transformadores de corrente e de potencial), casamento de impedâncias, filtragem e redução de ruídos elétricos [6][8][19].

Os transformadores podem ser associados em diferentes configurações, como estrela (Y) e triângulo (Δ), conforme descrito no Capítulo 2. Cada configuração possui aplicações distintas, escolhidas com base nos requisitos específicos do sistema, como adaptação de níveis de tensão e características da carga [6][8].

Na ligação estrela, cada transformador tem uma extremidade dos enrolamentos ligada a um ponto comum, usado como neutro, enquanto as outras extremidades são conectadas às linhas de fase, demonstrado na figura 4.1. Essa configuração permite tensões de linha mais elevadas que as tensões de fase, sendo ideal para cargas equilibradas e frequentemente utilizada em sistemas de distribuição que necessitam de um ponto de referência comum para estabilidade e segurança operacional[6][8][20].

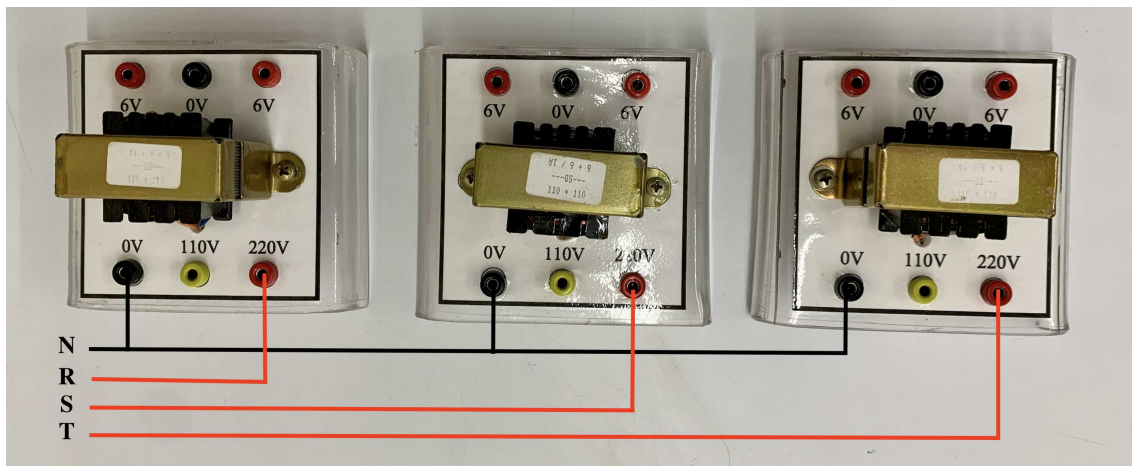


Figura 4.1 – Ligação de transformadores monofásicos na configuração estrela.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na ligação em triângulo (Δ), ilustrada na figura 4.2, os transformadores são conectados em série, formando um circuito fechado onde o final de cada enrolamento é conectado ao início do próximo. Nessa configuração, as tensões de linha e de fase são iguais, enquanto as correntes são obtidas pela soma vetorial das correntes de cada fase [11][21].

A ligação triângulo apresenta vantagens em sistemas sujeitos a desequilíbrios de carga, garantindo maior robustez operacional e permitindo a circulação de correntes mais elevadas. Por essas características, essa configuração é utilizada em transformadores de potência e em aplicações industriais que necessitam de estabilidade diante de variações na carga [6][8][20].

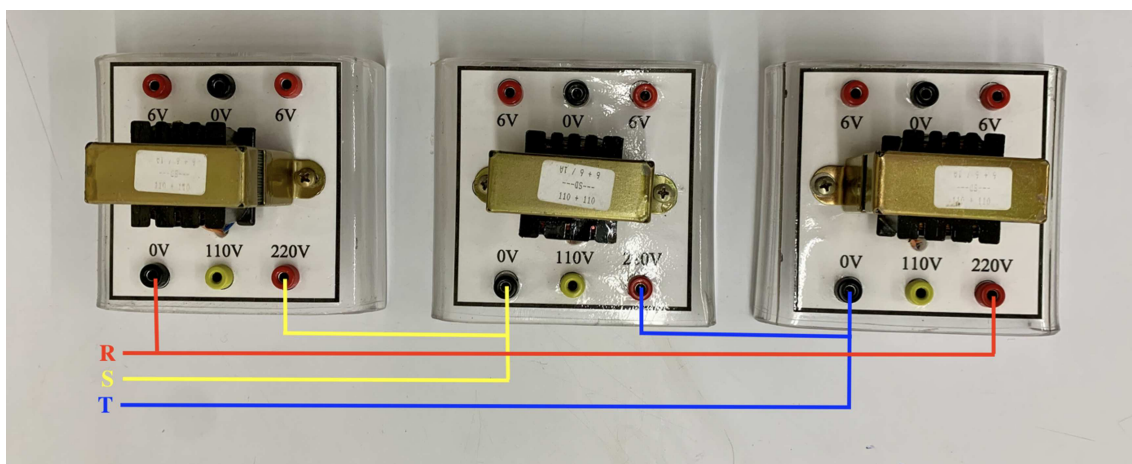


Figura 4.2 – Ligação de transformadores monofásicos na configuração estrela.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A escolha entre as configurações estrela e triângulo depende dos requisitos de cada sistema, tais como níveis de tensão, corrente, equilíbrio de cargas e necessidade de ponto neutro. Entender essas conexões é fundamental para garantir o funcionamento adequado dos sistemas elétricos trifásicos e assegurar eficiência e estabilidade na transmissão e distribuição de energia elétrica.

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

O experimento realizado nessa seção foi um exercício prático realizado em sala de aula, juntamente com os alunos do curso de Engenharia Elétrica. O objetivo foi observar as diferenças entre as ligações estrela-estrela e estrela-triângulo, além de comparar os resultados obtidos com os cálculos teóricos, conforme ilustrado na figura 4.3.



Figura 4.3 – Experimento realizado em sala de aula.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os transformadores utilizados nos experimentos possuem um enrolamento primário com taps em 110V e 220V e um enrolamento secundário com duas saídas de 6V, com um ponto central de referência em 0V, conforme ilustrado na figura 4.4.

No secundário, cada transformador fornece uma tensão de 6 V em cada extremidade em relação ao ponto central (0 V), totalizando 12 V entre os dois terminais. Essa configuração permite diferentes tipos de ligação, mas para os experimentos serão utilizados apenas os terminais da extremidade.



Figura 4.4 – Transformador utilizado nos experimentos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na primeira etapa do experimento, será realizada uma montagem estrela-estrela (Y–Y), onde o primário e secundário dos transformadores serão conectados em estrela. No primário, uma terminal de cada enrolamento do primário deve ser ligada a um único ponto, formando um ponto comum chamado de neutro (N), enquanto as outras extremidades serão conectadas às fases do sistema trifásico (R, S e T), conforme apresentado na figura 4.5.

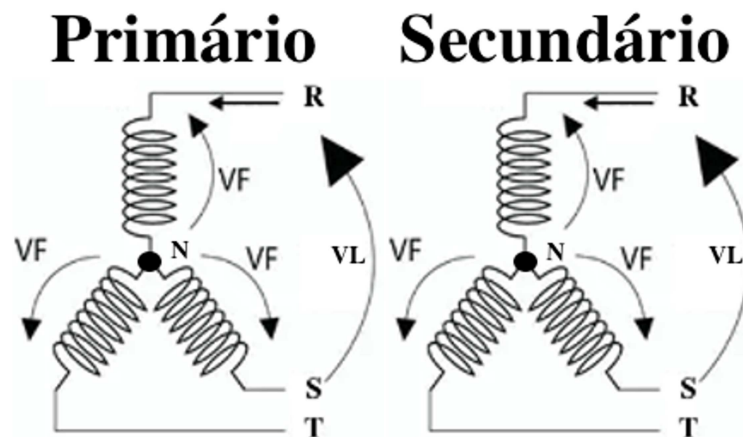


Figura 4.5 – Ligação do primário em estrela dos transformadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os secundários dos transformadores também serão conectados em estrela (Y). Assim como no primário, um dos terminais de cada secundário será interligado para formar o neutro (N), enquanto os outros terminais fornecerão as tensões de fase do sistema, conforme o esquemático mostrado na figura 4.6. Dessa forma, ao final da montagem, teremos um circuito onde tanto o primário quanto o secundário estão ligados em estrela.

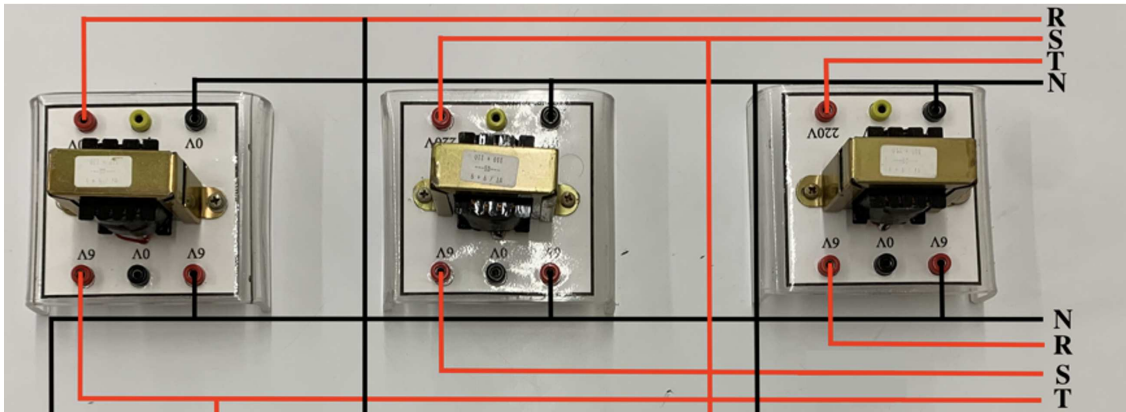


Figura 4.6 – Esquema de ligação estrela-estrela dos transformadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Sabendo que a tensão nominal de entrada do transformador é de 220V e que a tensão nominal de saída é de 12V, podemos determinar a relação de transformação (A) utilizando a equação 4.1.

$$A = \frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{220}{12} = 18,33 \quad (4.2)$$

Aplicando uma tensão de linha de 100 V no primário do transformador, podemos calcular a tensão de fase no secundário usando a relação de transformação encontrada anteriormente. Mas primeiro é necessário encontrar a tensão de fase do primário, que pode ser calculada pela equação 2.2:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \Rightarrow \frac{100}{\sqrt{3}} = 57,73 \text{ V} \quad (4.3)$$

Em posse da tensão de fase no primário e da relação de transformação, a tensão de fase no secundário pode ser determinada isolando V_s na equação 4.1:

$$V_s(t) = \frac{V_p(t)}{A} = \frac{57,73}{18,33} = 3,15 \text{ V} \quad (4.4)$$

Podemos obter a tensão de linha no secundário por meio da equação 2.1:

$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3} \Rightarrow 3,15 \cdot \sqrt{3} = 5,46 \text{ V} \quad (4.5)$$

Na segunda etapa do experimento, realizaremos a ligação estrela-triângulo, seguindo o diagrama apresentado na figura 4.7. Nessa configuração, o primário dos transformadores permanecerá conectado em estrela (Y), enquanto o secundário será conectado em triângulo (Δ).

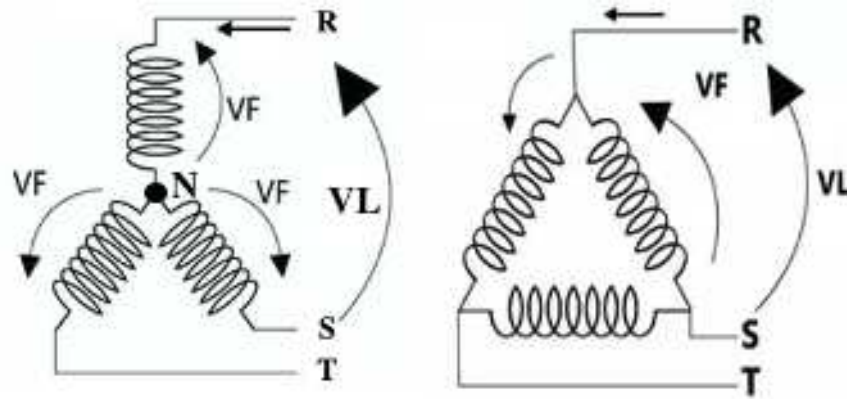


Figura 4.7 – Esquema de ligação estrela – triângulo dos transformadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A ligação estrela no primário segue o mesmo princípio descrito anteriormente, onde um dos terminais de cada enrolamento primário é interligado para formar o neutro (N), enquanto os outros terminais são conectados às três fases do sistema trifásico (R, S e T). Já no secundário, os enrolamentos dos transformadores são conectados em triângulo (Δ), onde o final de um enrolamento é conectado ao início do próximo, formando um circuito fechado entre as fases e eliminando a necessidade de um ponto neutro.

Ao final da montagem, teremos um circuito onde o primário está ligado em estrela e o secundário ligado em triângulo, conforme a figura 4.8.

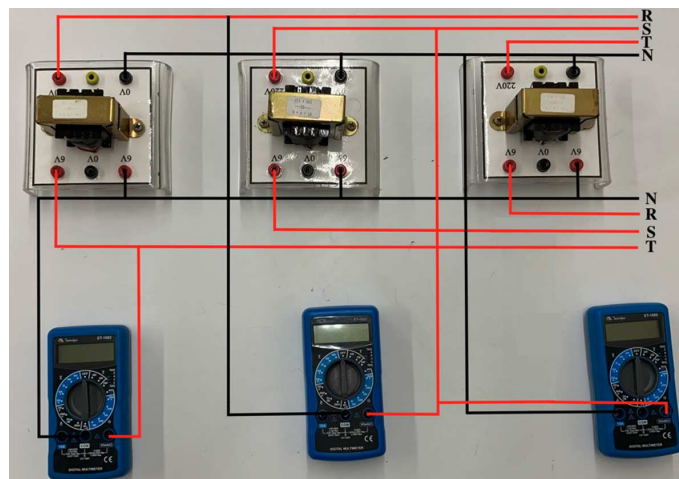


Figura 4.8 – Esquema de ligação estrela - triângulo dos transformadores.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como os transformadores utilizados neste experimento são os mesmos do experimento anterior, a relação de transformação também permanece a mesma, ou seja, $A = 18,33$. Para comparar as diferenças entre a ligação estrela (Y) e a ligação triângulo (Δ), aplicamos a mesma tensão no primário utilizada anteriormente, de $100V$. Dessa forma, a tensão de fase no primário também se mantém inalterada, com um valor de $V_F = 57,73V$.

Assim como nos passos anteriores, a tensão de fase no secundário permanece a mesma calculada anteriormente no experimento estrela-estrela, ou seja, $V_F = 3,15V$. A diferença na configuração triângulo (Δ) é que a tensão de linha no secundário é igual à tensão de fase, ou seja, $V_L = V_F = 3,15V$.

Com os valores teóricos calculados, é possível realizar a experimentação prática para comparar os resultados obtidos com os cálculos teóricos, verificando a compatibilidade entre a teoria e a prática.

Antes de iniciar os procedimentos práticos, é fundamental verificar cuidadosamente todas as conexões para garantir a segurança e a precisão das medições. Atenção especial deve ser dada à configuração dos multímetros, pois a medição será realizada no circuito estrela-estrela. Portanto, os multímetros devem estar ajustados para a escala de tensão alternada (AC), conforme ilustrado na figura 4.9.

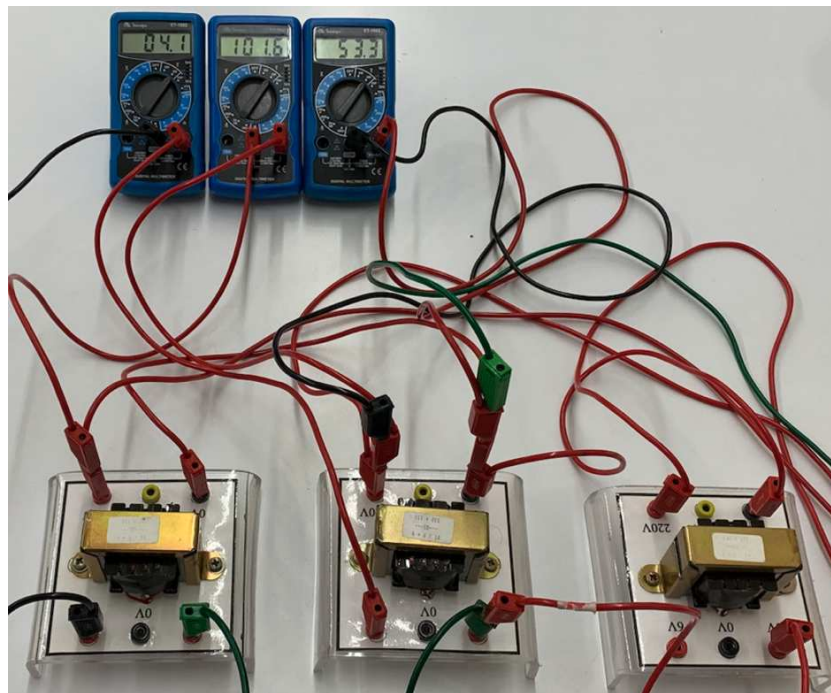


Figura 4.9 – Ligação estrela-estrela para a medição das tensões.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- Multímetro 1: Medir a tensão de fase no secundário.
- Multímetro 2: Medir a tensão de linha na entrada para ajustar corretamente o varivolt.
- Multímetro 3: Medir a tensão de fase no primário.

Durante os testes, foi observado que, se o terra da rede não estiver devidamente conectado, pode causar flutuações na tensão de saída, resultando em valores medidos inesperados.

Na figura 4.10 são mostrados os resultados alcançados após o correto aterramento do varivolt à rede de energia. Ainda assim, mesmo com o aterramento adequado, foram notadas pequenas divergências na tensão de saída, sugerindo que outros elementos, como interferências eletromagnéticas ou flutuações na rede, ou até mesmo diferenças de características entre os transformadores, podem afetar os valores de saída.

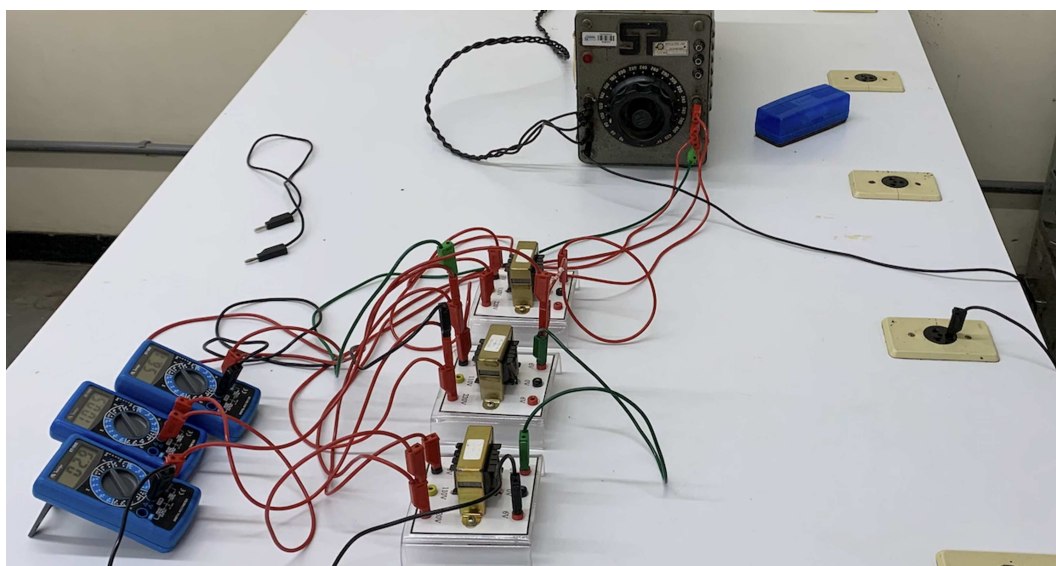


Figura 4.10 – Resultado da experimentação da ligação estrela-estrela prática.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Agora, passaremos para a montagem da ligação estrela-triângulo, conforme ilustrado na figura 4.11. É essencial prestar atenção à configuração dos multímetros, pois as medições serão realizadas nesse novo arranjo. Para garantir leituras precisas, os multímetros devem estar devidamente ajustados para a escala de tensão alternada (AC), conforme demonstrado na figura 4.12.

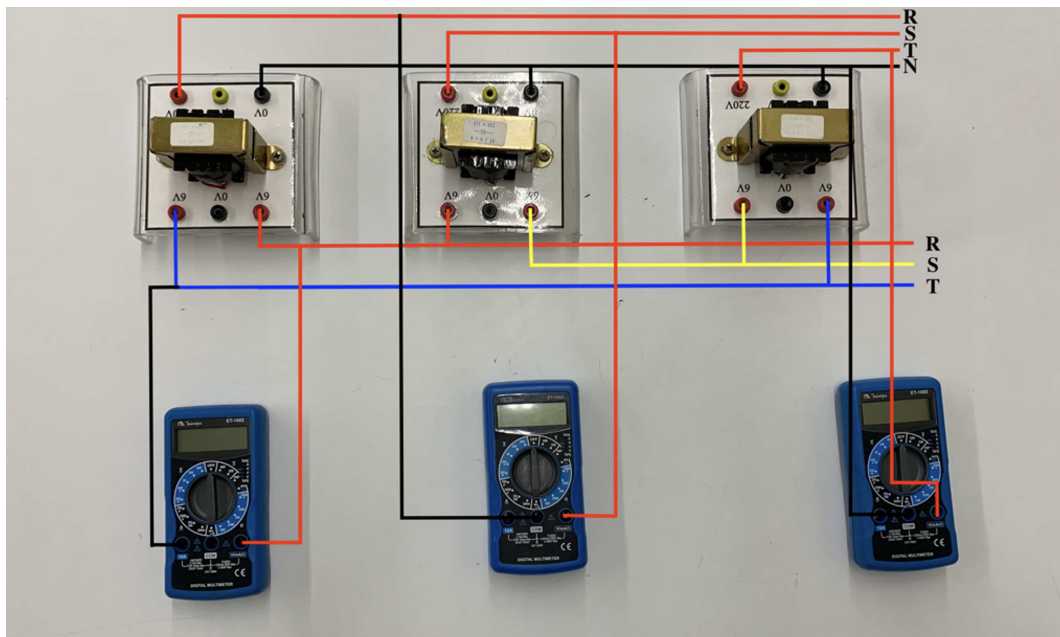


Figura 4.11 – Resultados após aterramento do varivolt na rede.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

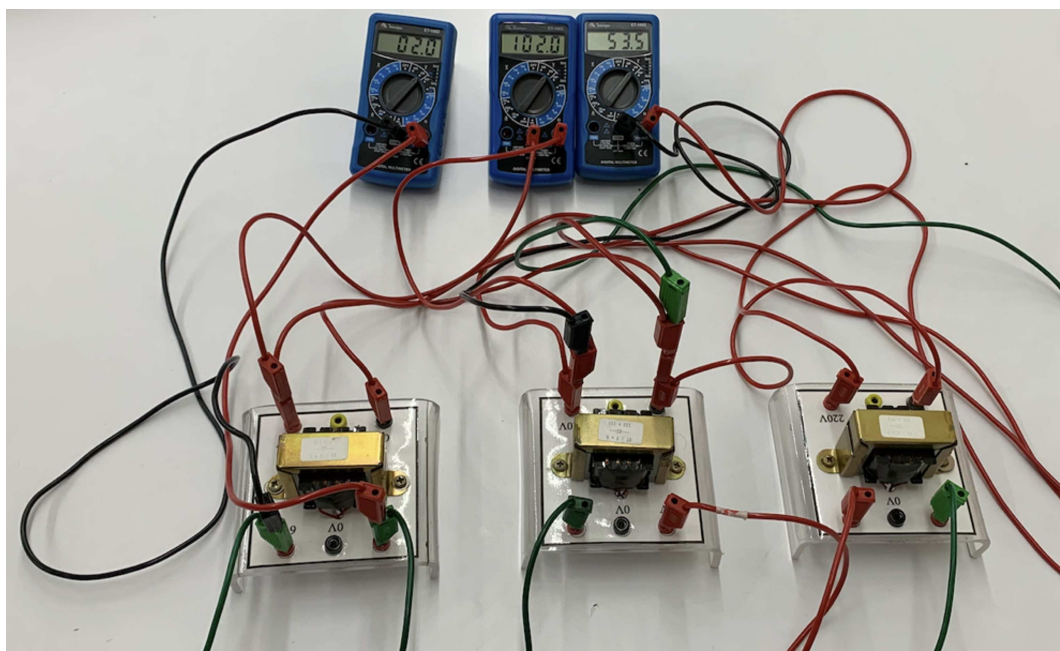


Figura 4.12 – Ligação estrela-triângulo para a medição das tensões.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- Multímetro 1: Medir a tensão de linha no secundário.
- Multímetro 2: Medir a tensão de linha na entrada para ajustar corretamente o varivolt.

- Multímetro 3: Medir a tensão de fase no primário.

Assim como na ligação estrela-estrela, na figura 4.9, este modelo de ligação também apresentou variação devido à ligação do primário ser a mesma configuração (estrela) do anterior, conforme apresentado na figura 4.12.

A suspeita da ocorrência da diferença entre os valores obtidos nos cálculos e na experimentação prática após o aterramento sugere que os transformadores não possuem as características exatamente iguais, e para afirmar essa possibilidade será necessário realizar os ensaios de curto-circuito e a vazio.

4.4 EXPERIMENTO 05 - ENSAIO DE TRANSFORMADORES EM CURTO-CIRCUITO

Motivação

O ensaio de curto-circuito é essencial para avaliar a eficiência dos transformadores, determinando perdas em carga e impedância equivalente. Compreender esse processo permite otimizar o desempenho elétrico, reduzindo desperdícios e garantindo maior segurança e confiabilidade na transmissão de energia.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é realizar e analisar o ensaio de curto-circuito em transformadores, determinando parâmetros como a impedância equivalente referida ao primário, as perdas em carga. Além disso, compararemos os resultados obtidos com os cálculos teóricos, identificando possíveis variações e suas causas.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Varivolt (0-250V, 0-5A mínimo)
- 01 Transformador (220V/24V)
- 04 Multímetros
- 01 Wattímetro
- Cabos para ligação

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ensaio de curto-circuito é um dos testes fundamentais realizados em transformadores para avaliar suas perdas em carga e a impedância equivalente. Esse ensaio consiste na aplicação de uma tensão reduzida ao primário do transformador até que a corrente nominal seja atingida, enquanto o secundário permanece curto-circuitado. Esse procedimento é essencial para determinar os parâmetros elétricos do transformador e compreender o comportamento das perdas no cobre [6][8][11].

Neste ensaio, o transformador opera em curto-circuito, ou seja, seu secundário é fechado sobre si, permitindo a circulação de uma corrente elevada. Como consequência, a tensão aplicada ao primário deve ser reduzida em relação à sua tensão nominal. Durante o teste, essa tensão é ajustada gradativamente até que a corrente no secundário atinja seu valor nominal. Nesse estado, a potência medida pelo wattímetro corresponde essencialmente às perdas ôhmicas (perdas no cobre) dos enrolamentos [13][19][20]. A figura 4.13 mostra o esquemático de ligação para o ensaio de curto-circuito.

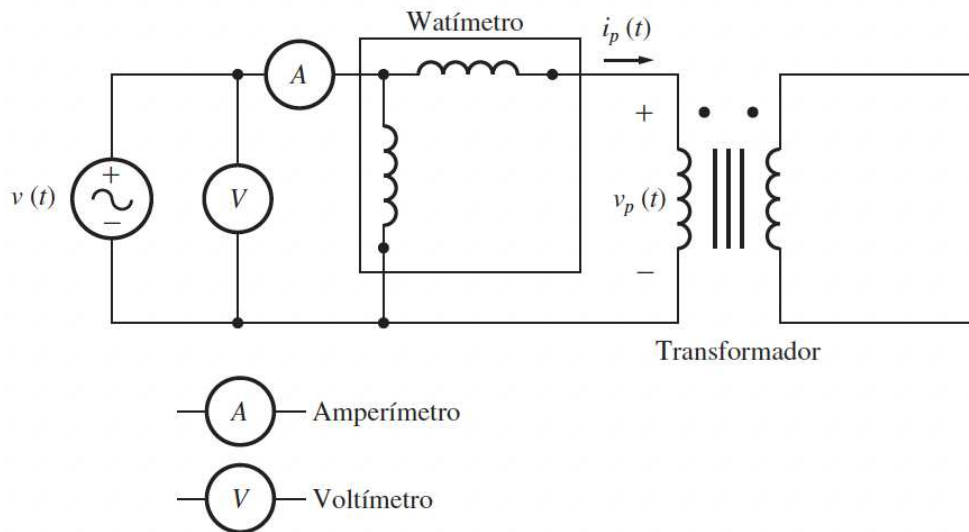


Figura 4.13 – Diagrama de ligação para ensaio em curto-circuito.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os principais parâmetros obtidos neste ensaio são:

- **Tensão de curto-circuito (V_{CC}):** É a tensão aplicada ao primário necessária para que a corrente nominal circule no secundário.
- **Corrente de curto-circuito (I_{CC}):** É a corrente medida no primário quando o ensaio está em andamento.

- **Potência de curto-circuito (P_{CC}):** Representa as perdas resistivas nos enrolamentos do transformador, também conhecidas como perdas no cobre.

O transformador pode ser representado por um modelo equivalente composto por impedâncias que descrevem suas principais características elétricas. No lado do primário, a resistência R_P e a reatância X_P modelam as perdas ôhmicas e a reatância de dispersão do enrolamento. O circuito magnético do núcleo é representado por uma impedância em paralelo, composta pela resistência R_C , que representa as perdas no ferro, e pela reatância de magnetização X_M , responsável pelo fluxo magnético no núcleo. Já no lado do secundário, a resistência R_S e a reatância X_S representam as perdas e a reatância de dispersão do enrolamento secundário. A figura 4.14 ilustra esse modelo equivalente do transformador [6][11][19].

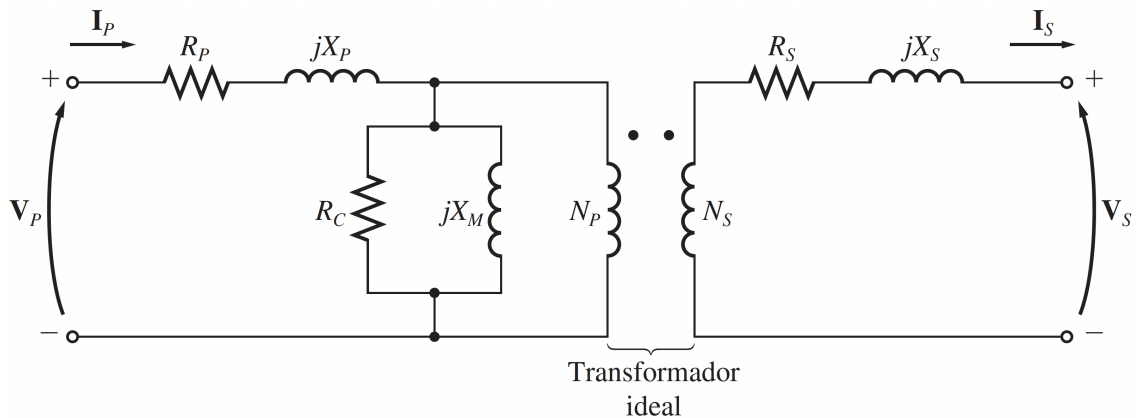


Figura 4.14 – Modelo de um transformador

Fonte: [11].

No ensaio de curto-circuito, o circuito do transformador pode ser analisado de forma mais simples, pois o secundário está curto-circuitado e a tensão aplicada no primário é reduzida. Nesse cenário, a corrente que circula pelo circuito é alta e limitada apenas pelas resistências e reatâncias dos próprios enrolamentos. Como consequência, a magnetização do núcleo se torna insignificante, permitindo que a admitância magnetizante ($R_C + jX_M$) seja desconsiderada no modelo. Dessa forma, o circuito equivalente se resume às impedâncias em série do primário ($R_P + jX_P$) e do secundário ($R_S + jX_S$), que representam as perdas elétricas e a dispersão do fluxo magnético nos enrolamentos. A potência medida durante o ensaio corresponde às perdas no cobre [6][8][11][13][19]. A figura 4.15 ilustra o modelo simplificado do transformador no ensaio de curto-circuito.

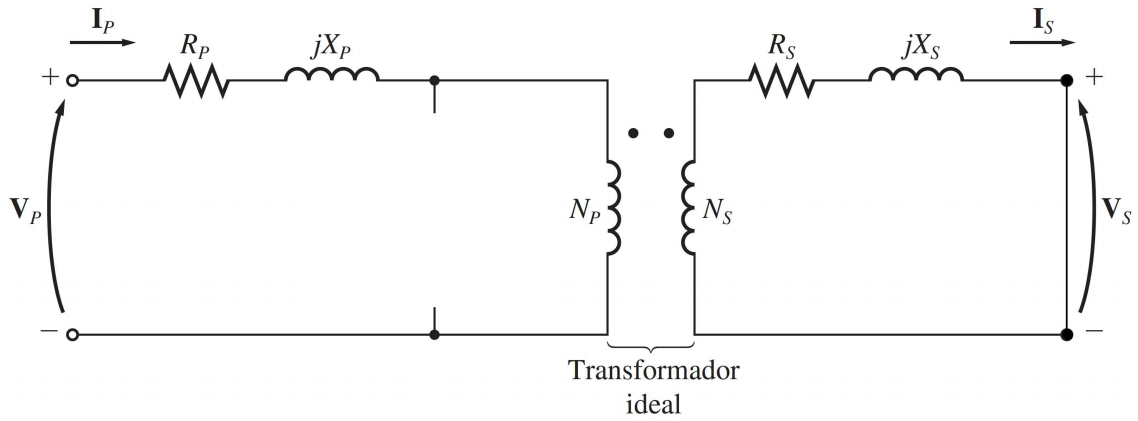


Figura 4.15 – Modelo de um transformador no ensaio de curto-circuito

Fonte: Adaptado de [11].

Com os valores de corrente e tensão obtidos no ensaio de curto-circuito, é possível determinar a impedância equivalente referida ao primário utilizando a lei de Ohm. A relação matemática é expressa por:

$$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (4.6)$$

A resistência equivalente dos enrolamentos pode ser determinada utilizando o valor da corrente, medido pelo amperímetro, e a potência dissipada, obtida pelo wattímetro, utilizada na relação abaixo:

$$R_{eq} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (4.7)$$

Com os valores da resistência e da impedância equivalente calculados, é possível determinar a reatância equivalente do transformador utilizando a relação:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (4.8)$$

O fator de potência (FP) pode ser calculado a partir dos valores de potência (P_{CC}), tensão (V_{CC}) e corrente (I_{CC}) medidos durante o ensaio. A relação matemática é dada por:

$$FP = \cos \left(\frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} \right) \quad (4.9)$$

Como o curto-circuito foi aplicado no secundário e os instrumentos de medição no primário, todos os valores obtidos durante o ensaio estão referidos ao primário. Caso fosse necessário referi-los ao secundário, a conversão poderia ser feita utilizando a seguinte equação:

$$Z_{eq,Secundário} = \left(\frac{N_S}{N_P} \right)^2 Z_{eq,Primário} \quad (4.10)$$

Onde:

- N_P e N_S representam o número de espiras do enrolamento primário e do secundário, respectivamente;
- Z_{eq} corresponde à impedância equivalente, referida ao primário ou ao secundário.

Ao final do ensaio, o transformador pode ser representado por um modelo equivalente, no qual sua impedância interna é modelada por uma resistência equivalente (R_{eq}) em série com uma reatância equivalente (jX_{eq}), como ilustrado na figura 4.16. Nesse modelo, o circuito do núcleo é desconsiderado, pois, durante o ensaio de curto-circuito, a tensão aplicada ao primário é baixa, resultando em uma corrente de magnetização desprezível e, conseqüentemente, em perdas no núcleo insignificantes.

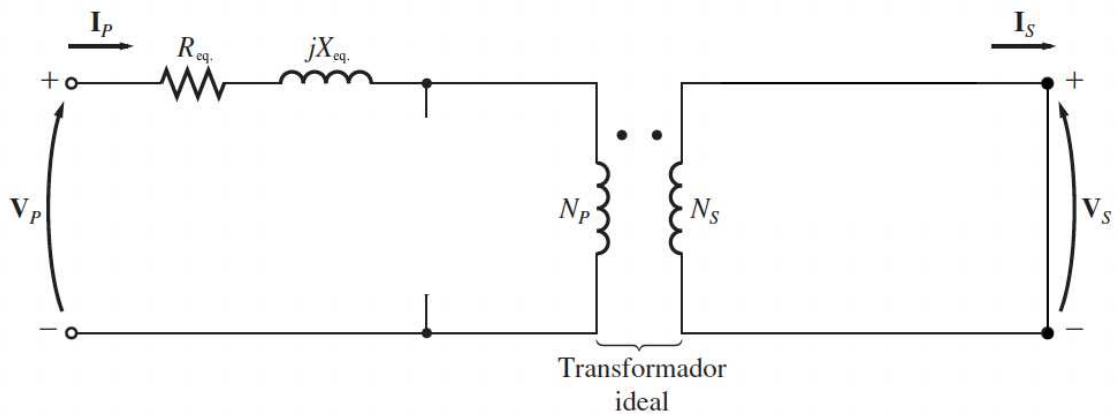


Figura 4.16 – Modelo equivalente a um transformador real

Fonte: Adaptado de [11].

Onde:

- R_{eq} representa a resistência equivalente do transformador, contendo as perdas ôhmicas nos enrolamentos do primário e do secundário.

- X_{eq} corresponde à reatância equivalente, que leva em conta o fluxo disperso que não contribui para a transferência de energia entre os enrolamentos.

O ensaio de curto-circuito é essencial para determinar as perdas nos enrolamentos, fornecendo informações fundamentais para a avaliação do desempenho e da eficiência do transformador.

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

Os transformadores utilizados neste experimento possuem características conhecidas, como potência, tensão de entrada e saída, além da corrente de saída. Essas informações são essenciais para validar os resultados matematicamente e experimentalmente. A figura 4.17 ilustra um dos transformadores utilizados nos testes.



Figura 4.17 – Transformador utilizado nos experimentos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Assim como no experimento anterior sobre ligação trifásica de transformadores, este transformador conta com um enrolamento no secundário que disponibiliza duas saídas de 12V. Essas saídas podem ser combinadas para fornecer 24V na saída, dependendo da configuração adotada.

Antes de iniciar o experimento, é fundamental garantir que o varivolt esteja ajustado para 0V, e preferencialmente desligado da tomada. Em seguida, conectar o amperímetro em série com a saída do varivolt para monitorar a corrente e adicionar um voltímetro em paralelo para medir a tensão aplicada. Além disso, incluir um wattímetro para registrar a potência consumida pelo circuito, assegurando medições precisas durante o ensaio.

Por fim, conectar o transformador em série com todo o conjunto de medição, assegurando que sua saída esteja devidamente curto-circuitada, conforme ilustrado na figura 4.18.

No ensaio de curto-circuito, o principal objetivo é determinar a impedância dos enrolamentos do primário e, conseqüentemente, do secundário do transformador. Para isso, é necessário ajustar gradualmente o varivolt até que a corrente medida pelo amperímetro atinja o valor nominal do transformador.

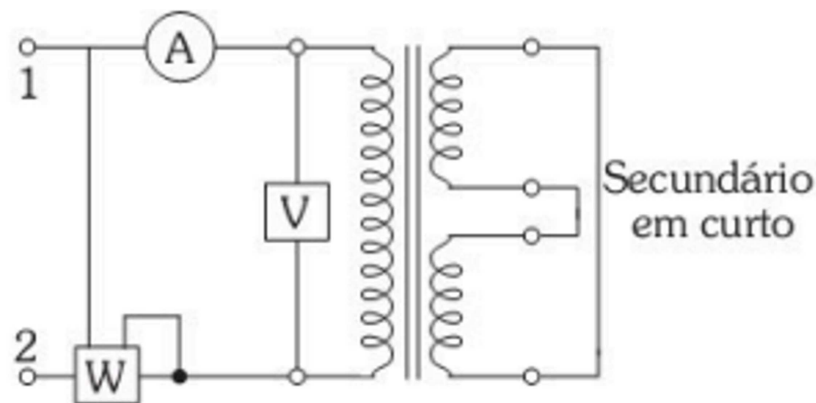


Figura 4.18 – Diagrama de ligação para ensaio em curto-circuito.

Fonte: [6].

Esse procedimento permite avaliar as perdas elétricas nos enrolamentos e calcular com precisão a impedância equivalente do transformador, fornecendo informações essenciais para sua caracterização e eficiência.

Tabela 4.1 – Parâmetros do ensaio de curto-circuito.

Ensaio de curto-circuito (no lado do primário)	
Parâmetro	Valor Medido
V_{CC} (V)	-
I_{CC} (A)	-
P_{CC} (W)	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após obter os valores de tensão (V_{CC}), corrente (I_{CC}) e potência (P_{CC}) durante o ensaio de curto-circuito, é possível determinar a impedância equivalente dos enrolamentos

do transformador utilizando a 4.6:

$$Z_{eq} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (4.11)$$

Após obter os valores durante o ensaio, é possível determinar a resistência equivalente (R_{eq}) do transformador, que representa a parcela resistiva da impedância equivalente e está diretamente relacionada às perdas no cobre dos enrolamentos. Esse cálculo pode ser feito por meio da equação 4.7:

$$R_{eq} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (4.12)$$

Após determinar a impedância equivalente (Z_{eq}), que está associada à energia armazenada no campo magnético do transformador e influencia seu comportamento dinâmico e resposta a variações de carga, e a resistência equivalente (R_{eq}), é possível calcular a reatância equivalente (X_{eq}). Neste caso, a reatância é predominantemente indutiva e pode ser obtida por meio da equação 4.8:

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (4.13)$$

Também é possível calcular o fator de potência (FP) utilizando a equação 4.9, que considera a relação entre potência, tensão e corrente medidas no ensaio de curto-circuito:

$$FP = \cos^{-1} \left(\frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} \right) \quad (4.14)$$

Com todos os valores obtidos, é possível refletir as impedâncias para o secundário do transformador. Para isso, utilizamos a equação 4.10:

$$Z_{eq, \text{Primário}} = \left(\frac{N_P}{N_S} \right)^2 Z_{eq, \text{Secundário}} \quad (4.15)$$

Esse ensaio é importante para a determinação da capacidade de carregamento do transformador, além da análise das perdas resistivas, fundamentais para a avaliação do desempenho do equipamento.

4.5 EXPERIMENTO 06 - ENSAIO DE TRANSFORMADORES Á VAZIO

Motivação

O ensaio a vazio é essencial para determinar as perdas no núcleo do transformador e a corrente de magnetização. Compreender esses parâmetros é fundamental para otimizar o desempenho, a eficiência desses dispositivos e garantir a operação segura de transformadores em sistemas elétricos.

• OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é realizar e analisar o ensaio a vazio em transformadores, determinando parâmetros como a corrente de magnetização, as perdas no ferro e a impedância do núcleo. Além disso, compararemos os resultados obtidos com os cálculos teóricos, identificando possíveis variações e suas causas.

• MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Varivolt (0-250V, 0-5A mínimo)
- 01 transformadores (220V/24V)
- 04 Multímetros
- 01 Wattímetro
- Cabos para ligação

• FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O ensaio a vazio realizado em transformadores é utilizado para identificar as perdas no ferro e analisar o comportamento da magnetização do núcleo. Esse teste consiste em aplicar uma tensão no enrolamento primário enquanto o secundário permanece aberto, sem carga conectada. Como não há circulação de corrente no secundário, a corrente consumida pelo primário é destinada exclusivamente à magnetização do núcleo. Esse procedimento permite determinar os parâmetros elétricos do transformador e compreender as perdas magnéticas que ocorrem no seu núcleo [8][11].

Nesse regime, a corrente consumida pelo primário é relativamente baixa, pois sua função principal da corrente é alimentar o fluxo magnético no núcleo do transformador. A potência medida pelo wattímetro durante esse ensaio corresponde às perdas no ferro, que

incluem perdas por histerese e correntes parasitas. Essas perdas são inerentes ao material ferromagnético do núcleo e influenciam diretamente a eficiência do transformador [6][13]. A figura 4.19 mostra o esquemático de ligação para o ensaio a vazio do transformador.

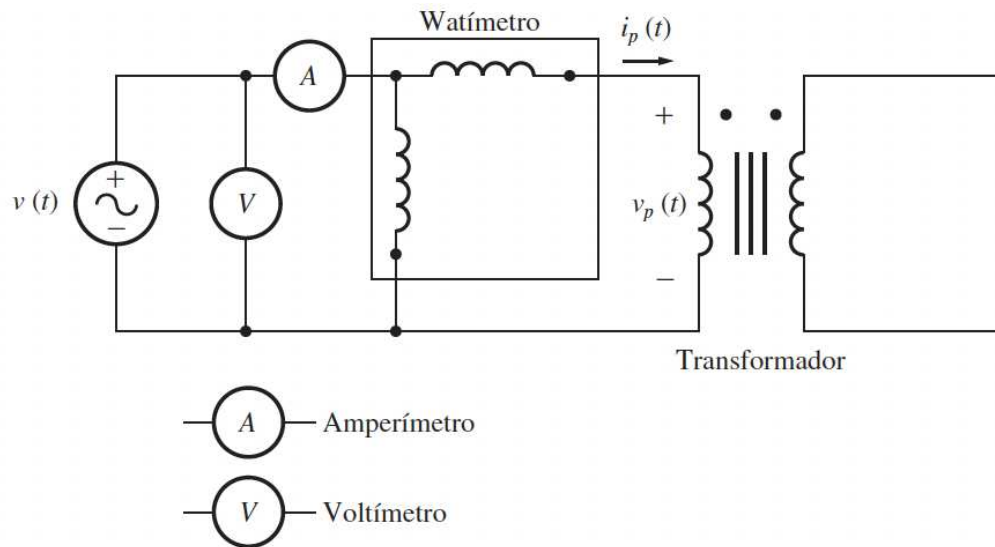


Figura 4.19 – Diagrama de conexão para o ensaio a vazio.

Fonte: [11].

Os principais parâmetros obtidos neste ensaio são:

- **Tensão a vazio** (V_0): Tensão aplicada ao primário com o secundário aberto.
- **Corrente a vazio** (I_0): Corrente absorvida pelo transformador para magnetização do núcleo.
- **Potência a vazio** (P_0): Representa as perdas no ferro do transformador.

Assim como no ensaio de curto-circuito, o ensaio a vazio permite simplificar a modelagem do transformador. Nesse caso, o enrolamento primário é representado por uma resistência equivalente do núcleo (R_C), que corresponde às perdas no ferro, e uma reatância de magnetização (X_M), que reflete a energia armazenada no campo magnético do núcleo, conforme ilustrado na figura 4.20. Como o secundário permanece aberto, não há circulação de corrente nesse enrolamento, o que significa que sua impedância equivalente não interfere na análise do ensaio. Dessa forma, toda a corrente medida no primário é exclusivamente destinada à magnetização do núcleo, tornando as perdas ôhmicas nos enrolamentos desprezíveis. Com isso, o ensaio a vazio permite avaliar diretamente as perdas magnéticas do transformador, sem interferências da carga ou da impedância do secundário [6][11][19].

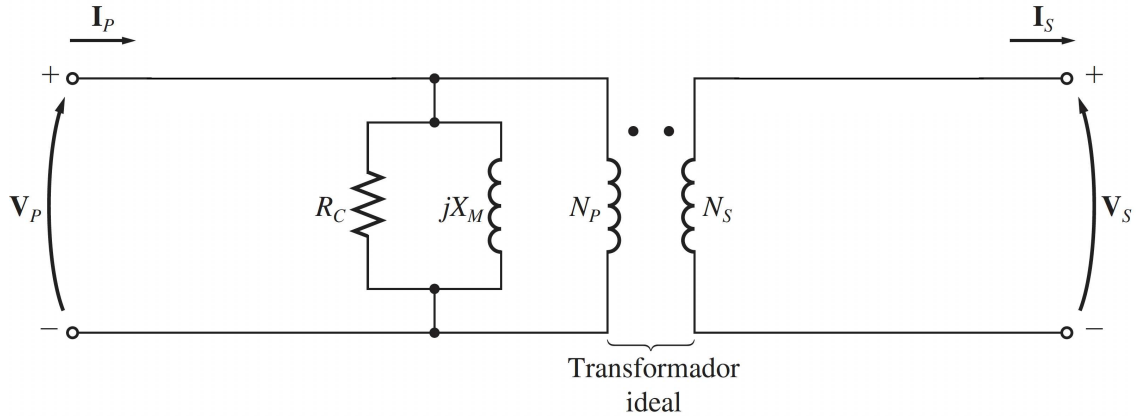


Figura 4.20 – Modelo simplificado de um transformador para ensaio a vazio.

Fonte: Adaptado de [11].

O fator de potência (FP) do transformador no ensaio a vazio pode ser determinado a partir das medições de potência, tensão e corrente. Ele representa a relação entre a potência ativa dissipada e a potência aparente total consumida pelo transformador [8][11][19], expressada por:

$$FP = \cos \left(\frac{P_0}{V_0 I_0} \right) \quad (4.16)$$

Para obter os parâmetros reativos do transformador, é necessário determinar a corrente de magnetização (I_m), que corresponde à parcela da corrente no primário responsável por gerar o fluxo magnético no núcleo. Essa corrente é essencial para manter a indução magnética no circuito magnético do transformador e está diretamente relacionada às características do material do núcleo e às perdas magnéticas, como histerese e correntes parasitas [6][13].

$$I_M = I_0 \cdot \sin(\theta) \quad (4.17)$$

Com os valores de corrente e tensão obtidos no ensaio a vazio, é possível determinar a impedância equivalente referida ao primário aplicando a lei de Ohm. Essa impedância representa a oposição do núcleo à passagem da corrente magnetizante e está associada às características do material e às perdas magnéticas do transformador [14][20]. Pode ser expresso por:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (4.18)$$

A resistência equivalente do núcleo (R_C), que representa as perdas no ferro do transformador por histerese e correntes parasitas, pode ser determinada utilizando os valores da corrente a vazio, medida pelo amperímetro, e da potência dissipada, obtida pelo wattímetro. Essa resistência reflete a dissipação de energia no núcleo magnético e pode ser calculada pela relação [9][15]:

$$R_C = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (4.19)$$

A reatância de magnetização (X_M) pode ser determinada a partir dos valores medidos no ensaio a vazio e da corrente de magnetização (I_m), calculada anteriormente. Essa grandeza representa a energia armazenada no campo magnético do núcleo do transformador [8][19]. Pode ser obtida pela relação:

$$X_M = \frac{V_0}{I_M} \quad (4.20)$$

O ensaio a vazio é útil para determinar as perdas magnéticas do transformador e parâmetros como R_C e X_M , fundamentais para melhorar sua eficiência, desempenho e confiabilidade operacional e dimensionamento do equipamento [11][12].

• PROCEDIMENTO PRÁTICO

Os transformadores utilizados neste experimento possuem características conhecidas, como potência, tensão de entrada e saída, além da corrente de saída. Essas informações são essenciais para validar os resultados matematicamente e experimentalmente. A figura 4.21 ilustra um dos transformadores utilizados nos testes.

Antes de iniciar o experimento, é fundamental garantir que o varivolt esteja ajustado para 0V, e preferencialmente desligado da tomada. Em seguida, conectar o amperímetro em série com a saída do varivolt para monitorar a corrente e adicionar um voltímetro em paralelo para medir a tensão aplicada. Além disso, incluir um wattímetro para registrar a potência consumida pelo circuito, assegurando medições precisas durante o ensaio.



Figura 4.21 – Transformador utilizado nos testes.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

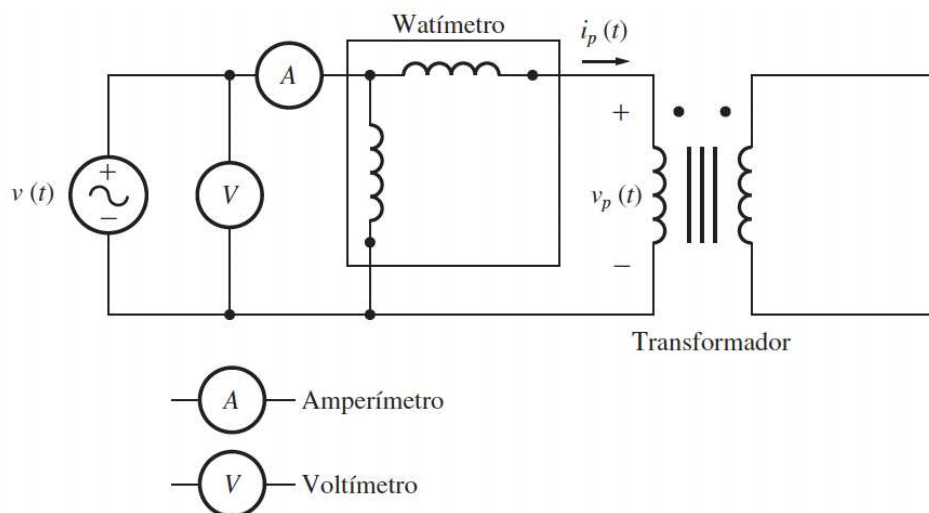


Figura 4.22 – Diagrama de ligação para ensaio a vazio.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O objetivo deste experimento é determinar as impedâncias do núcleo do transformador, por meio da corrente que alimenta o núcleo. Para isso, o transformador deve ser conectado em série com o conjunto de medição, mantendo o secundário em aberto, conforme ilustrado na figura 4.22.

No ensaio a vazio, a tensão é ajustada gradualmente até atingir a tensão nominal no primário. Esse ensaio permite avaliar as perdas no ferro e calcular a impedância equivalente do núcleo, fornecendo dados importantes para a análise da eficiência e do desempenho do transformador.

Tabela 4.2 – Parâmetros do ensaio a vazio.

Ensaio a vazio (no lado do primário)	
Parâmetro	Valor Medido
V_0 (V)	-
I_0 (A)	-
P_0 (W)	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Primeiramente, é necessário calcular o fator de potência, que representa a relação entre a potência ativa e a potência aparente do circuito. Esse valor pode ser determinado por meio da Equação 4.16:

$$FP = \cos \left(\frac{P_0}{V_0 I_0} \right) \quad (4.21)$$

Após obter os valores de tensão (V_0), corrente (I_0) e potência (P_0) durante o ensaio a vazio, é necessário determinar a impedância equivalente do núcleo utilizando a equação 4.18:

$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} \quad (4.22)$$

Com a potência medida pelo wattímetro e a tensão obtida pelo voltímetro, é possível determinar a resistência do núcleo (R_C), que representa as perdas no ferro do transformador. Essa resistência pode ser calculada utilizando a equação 4.19:

$$R_C = \frac{V_0^2}{P_0} \quad (4.23)$$

Após determinar a impedância do núcleo (Z_0) e a resistência do núcleo (R_C), a reatância de magnetização (X_M) pode ser obtida utilizando o método quadrático ou substituindo a equação 4.17 na Equação 4.20. Essa reatância representa a oposição do núcleo à variação do fluxo magnético e pode ser calculada pelas seguintes expressões:

$$X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_C^2} \quad (4.24)$$

$$X_M = \frac{V_0}{I_0 \cdot \sin(\theta)} \quad (4.25)$$

Com esses cálculos, é possível caracterizar o comportamento magnético do transformador e analisar as perdas no núcleo.

4.6 CONCLUSÃO

Os transformadores desempenham um papel essencial na transmissão e distribuição de energia elétrica, permitindo a adaptação dos níveis de tensão para garantir eficiência e segurança no fornecimento de eletricidade. Neste capítulo, foram explorados seus princípios de funcionamento, as configurações de ligação mais comuns e os principais testes utilizados para avaliar seu desempenho. Os experimentos realizados demonstraram, de forma prática, como esses dispositivos operam e como suas características influenciam o sistema elétrico.

Além de proporcionar uma compreensão mais clara sobre a conversão de tensão e corrente, este capítulo estabelece a base para o estudo das máquinas elétricas, tema do capítulo 5. Motores e geradores dependem diretamente do fornecimento adequado de energia, garantido pelos transformadores. Assim, o entendimento de seu funcionamento é fundamental para analisar a operação das máquinas elétricas em diferentes aplicações industriais e comerciais.

5 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Motivação

As máquinas elétricas são essenciais para a conversão de energia e desempenham um papel crucial na indústria e no cotidiano. O estudo dessas máquinas permite compreender seus princípios de funcionamento, otimizar seu desempenho e aplicar conceitos fundamentais como indução eletromagnética e controle de torque e velocidade. Compreender os motores elétricos, geradores e transformadores é essencial para o avanço tecnológico e a eficiência dos sistemas elétricos modernos.

5.1 APRESENTAÇÃO

As máquinas elétricas desempenham um papel fundamental em aplicações industriais e comerciais, sendo responsáveis pela conversão entre energia elétrica e mecânica. Motores elétricos são amplamente utilizados para acionar sistemas mecânicos, enquanto geradores convertem energia mecânica em elétrica para alimentar redes e dispositivos. Compreender o funcionamento desses equipamentos é essencial para o desenvolvimento de sistemas elétricos eficientes e confiáveis.

No capítulo 4, foram abordados os transformadores, dispositivos essenciais para a adaptação dos níveis de tensão nos sistemas elétricos. A operação das máquinas elétricas depende diretamente do fornecimento de energia adequado, garantindo a tensão e a corrente necessárias para seu funcionamento eficiente. Assim, o estudo dos transformadores fornece uma base fundamental para a análise das máquinas elétricas, pois ambos os dispositivos operam baseados nos princípios da indução eletromagnética.

Neste capítulo, exploraremos os diferentes tipos de máquinas elétricas, suas classificações e princípios de funcionamento. Serão analisados motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), incluindo os motores de indução trifásicos, amplamente utilizados na indústria. Além disso, serão discutidas as características operacionais dos geradores elétricos e suas aplicações no setor energético. Para complementar o estudo teórico, experimentos práticos serão realizados para demonstrar o comportamento desses dispositivos em diferentes condições de operação.

O conhecimento adquirido neste capítulo será essencial para compreender a aplicação prática das máquinas elétricas nos mais diversos setores. Além disso, permitirá correlacionar os conceitos estudados anteriormente sobre conversão de energia elétrica e

transformadores, consolidando a compreensão do funcionamento integrado dos sistemas elétricos.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Uma grande parte das aplicações industriais que envolvem comandos elétricos está relacionada ao acionamento de motores elétricos. Esses motores são fundamentais na conversão de energia elétrica em energia mecânica e podem ser classificados em duas grandes categorias: Motores de Corrente Contínua (CC) e Motores de Corrente Alternada (CA) [8][11].

Os motores de corrente contínua possuem características distintas e são amplamente utilizados em aplicações que exigem controle preciso de velocidade e torque. Sua operação é baseada na interação entre o campo magnético gerado pelo estator e a corrente elétrica que circula pelo rotor, proporcionando a rotação do eixo [6][13].

Por outro lado, os motores de corrente alternada são mais comuns em aplicações industriais devido à sua robustez e eficiência. Esses motores podem ser subdivididos em motores síncronos e motores de indução. Os motores síncronos operam em velocidade constante, determinada pela frequência da rede elétrica, enquanto os motores de indução são amplamente utilizados por sua simplicidade construtiva e facilidade de manutenção [12][14].

A figura 5.1 apresenta a classificação dos motores elétricos de corrente contínua, enquanto a figura 5.2 ilustra a divisão dos motores elétricos de corrente alternada.

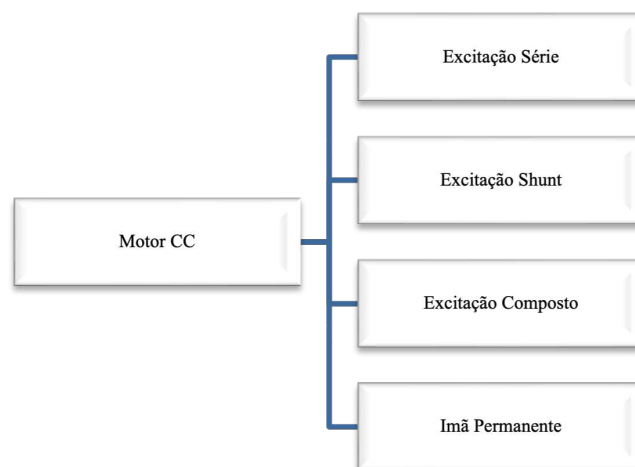


Figura 5.1 – Classificação dos motores elétricos de corrente contínua (CC).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

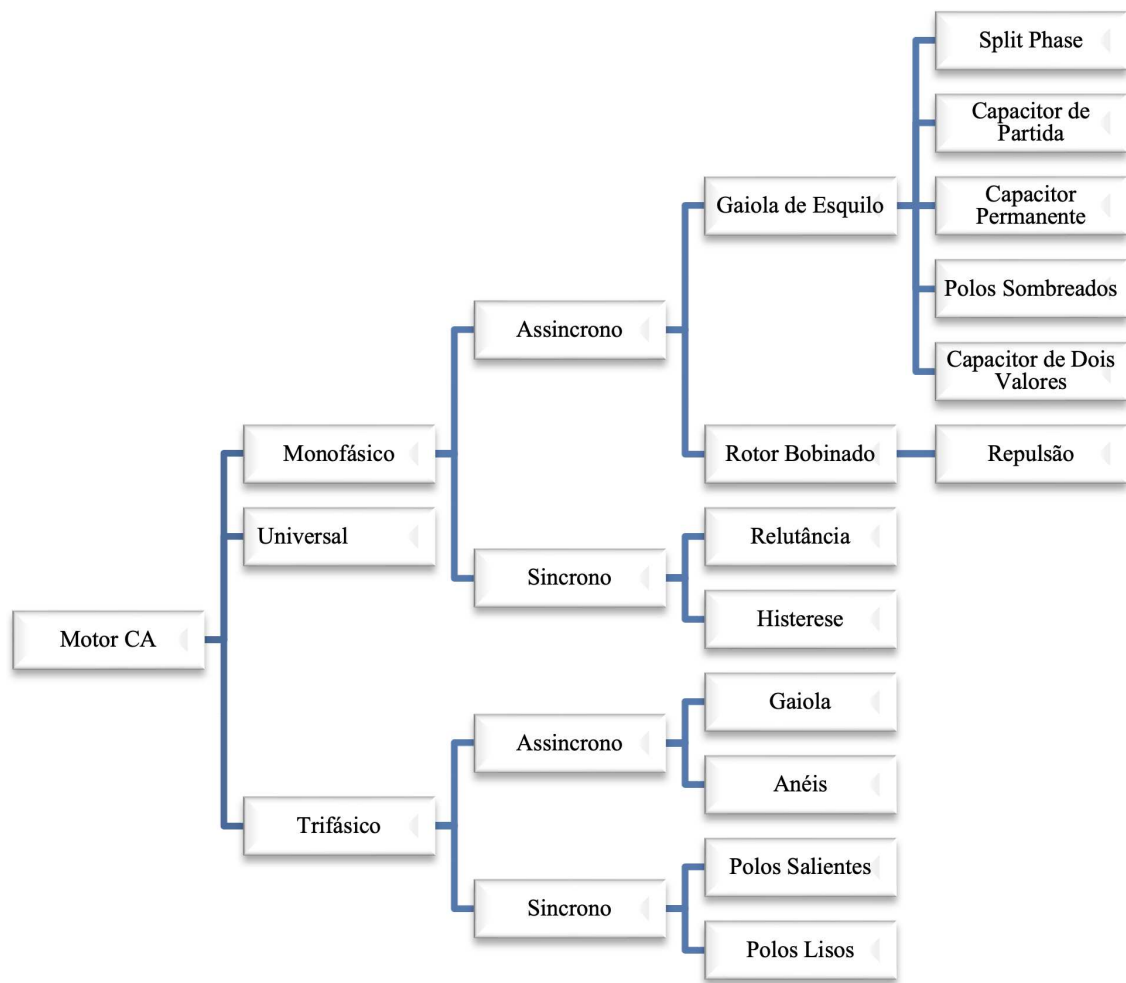


Figura 5.2 – Classificação dos motores elétricos de corrente alternada (CA).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3 MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

As máquinas elétricas de corrente contínua (CC) desempenharam um papel relevante ao longo do tempo ao possibilitar a conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa. Elas foram amplamente utilizadas em indústrias e sistemas de transporte devido à facilidade no controle da velocidade e da força (torque). Com o desenvolvimento das máquinas de corrente alternada (CA), que se destacaram por serem mais eficientes e requererem menos manutenção, as máquinas de CC passaram a ser gradualmente substituídas [6][11].

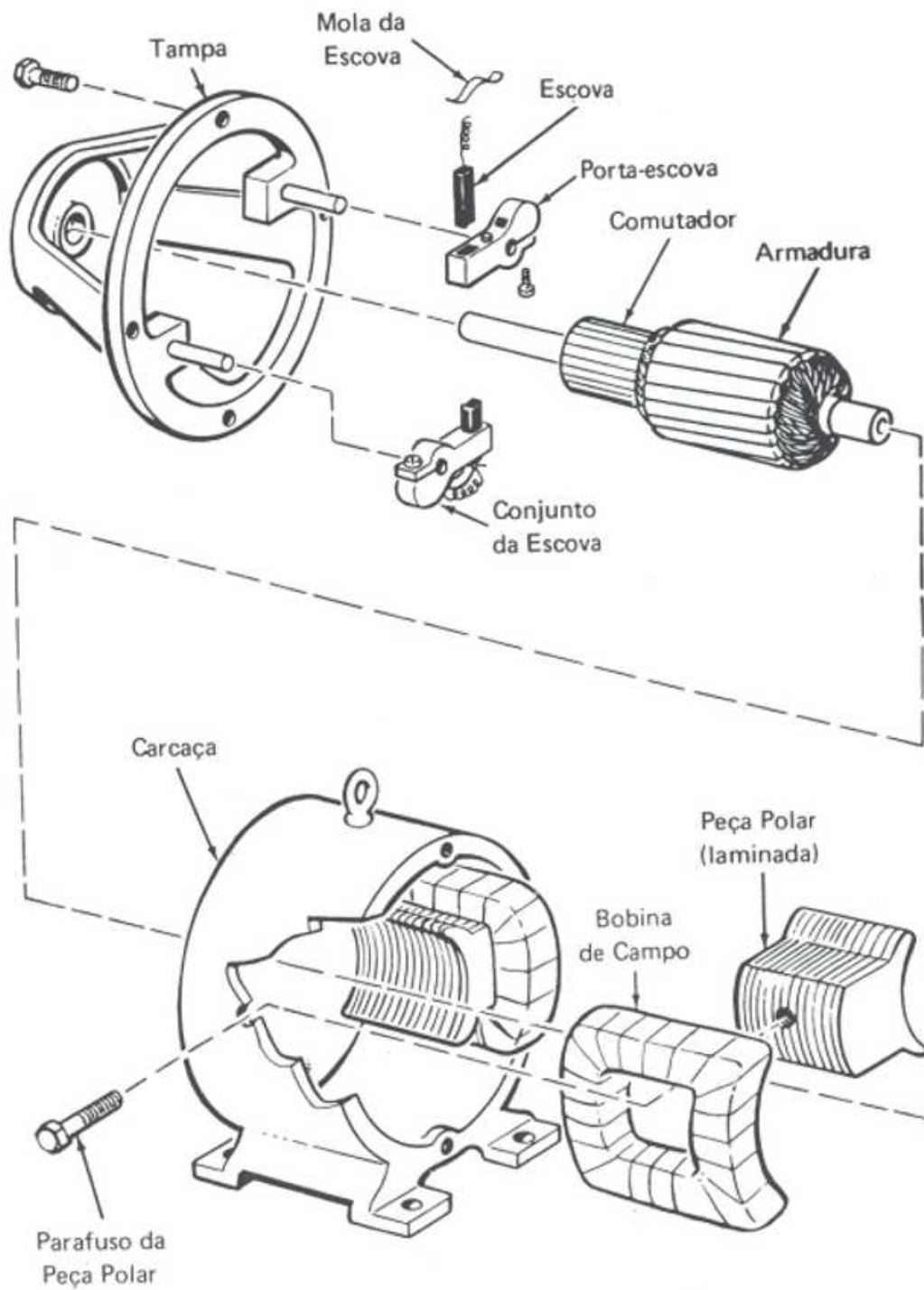


Figura 5.3 – Vista explodida de uma máquina CC.

Fonte: Autor desconhecido.

Apesar disso, estudar as máquinas de corrente contínua ainda é importante, pois ajuda a compreender os princípios básicos das máquinas elétricas. A seguir, serão descritas as principais partes da máquina de corrente contínua da figura 5.3.

- **Carcaça**

A carcaça é a estrutura que sustenta e protege os componentes internos da máquina. Os motores de grande porte, são geralmente fabricadas em aço sólido, enquanto em máquinas menores utilizam-se chapas de aço laminadas [11][16].

As carcaças podem ser construídas de três modos distintos:

- Carcaças abertas: Possuem extremidades abertas para facilitar a refrigeração.
- Carcaças semiabertas: Contêm aberturas protegidas por grades ou grelhas metálicas.
- Carcaças fechadas: Não possuem aberturas, sendo utilizadas em ambientes mais agressivos.

- **Mancais e rolamentos**

Os mancais e rolamentos são responsáveis por suportar o eixo da máquina, permitindo uma rotação suave e eficiente além de permitir a transferência de torque, figura 5.4. Geralmente, são fabricados em aço ou ferro fundido, para garantir resistência mecânica. Esses componentes costumam ser instalados nas extremidades da carcaça, onde são fixados por meio de parafusos [8][11].



Figura 5.4 – Exemplo de um mancal de rolamento.

Fonte: Autor desconhecido.

- **Enrolamento de campo (Estator)**

O estator é a parte fixa da máquina de corrente contínua, é responsável por abrigar o enrolamento de campo ou os ímãs permanentes que criam o campo magnético necessário ao funcionamento da máquina[19]. Esse campo interage com a armadura para converter energia elétrica em mecânica (motor) ou mecânica em elétrica (gerador).

O enrolamento de campo no estator pode ser composto por um ou mais enrolamentos por polo. Os polos são organizados de maneira alternada (norte-sul-norte-sul), garantindo a uniformidade do campo magnético. Quando se deseja um campo magnético mais intenso, podem ser utilizados múltiplos pares de enrolamentos dispostos a distâncias iguais [6][8].

As máquinas de corrente contínua (CC) podem ser classificadas em duas categorias principais: máquinas de autoexcitação e máquinas de excitação independente [8][11].

Nos motores CC de autoexcitação, a corrente fornecida para alimentar o enrolamento de campo é a mesma fornecida que alimenta a armadura. Esse tipo de motor é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficiência, sendo comum em aplicações onde o controle de velocidade não é um fator determinante. Como essa excitação ocorre pode variar, podendo ser em série, em derivação ou composta [11][14].

Já nos motores de excitação independente, a corrente do campo é fornecida por uma fonte externa, permitindo um controle mais preciso da velocidade e do torque. Esse tipo de motor é ideal para aplicações industriais que exigem variação de velocidade com alto desempenho, como sistemas de acionamento em processos automatizados [6].

Além dos motores, os geradores CC também podem ser classificados com base na fonte de corrente de campo. Eles podem obter essa corrente de uma fonte externa ou da própria armadura, no caso dos geradores autoexcitados. A escolha do tipo de excitação influencia diretamente na estabilidade da tensão gerada e na resposta do sistema [11].



Figura 5.5 – Enrolamento de campo (estator) da máquina.

Fonte: Autor desconhecido.

O estator dessas máquinas pode conter peças polares, que sustentam os fios do enrolamento e contribuem para a formação do campo magnético. Essas peças sempre

operam aos pares (polo norte e polo sul), distribuindo o fluxo magnético de maneira uniforme e garantindo uma conversão eficiente de energia. A figura 5.5 ilustra a disposição do enrolamento de campo no estator, destacando as peças polares e os fios que, em conjunto, criam o campo magnético necessário para o funcionamento adequado da máquina.

- **Escovas**

As escovas são o meio de contato entre a armadura (rotor) e o circuito externo. São compostas por um bloco condutivo (normalmente carvão ou liga metálica), uma mola que mantém a pressão contra o comutador e um fio metálico que conduz a corrente, conforme a figura 5.6 [6].

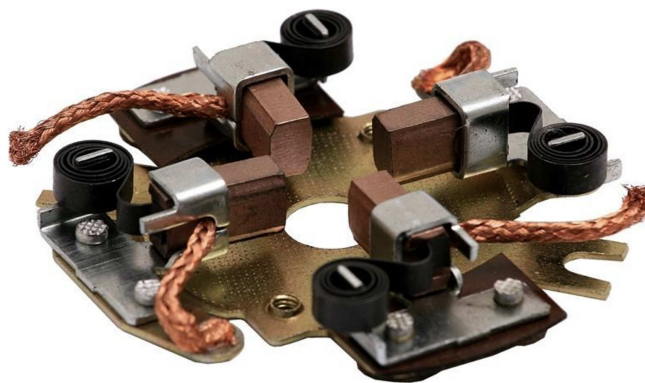


Figura 5.6 – Escova da máquina de corrente contínua.

Fonte: Autor desconhecido.

- **Comutador**

O comutador é um componente essencial em máquinas de corrente contínua, sendo responsável por inverter a direção da corrente nos enrolamentos da armadura a cada meio ciclo, para assegurando um torque constante na mesma direção [11]. Ele é composto por segmentos metálicos isolados entre si por lâminas de mica ou outro material isolante. Cada extremidade dos enrolamentos da armadura está conectada a um par de segmentos do comutador, conforme ilustrado na figura 5.7. Esse dispositivo assegura que o motor continue girando sem pausas e previne mudanças indesejadas na direção do movimento.

Nos motores de corrente contínua, o comutador desempenha um papel essencial ao inverter a direção da corrente elétrica nos enrolamentos da armadura a cada meia rotação. Esse processo garante que o torque gerado permaneça na mesma direção, mantendo o rotor girando continuamente. Como ilustrado na figura 5.8, o campo magnético gerado pelo enrolamento de campo interage com a corrente que circula na bobina condutora, produzindo forças opostas em cada lado da bobina. Essa interação cria um torque que

movimenta o rotor, enquanto as escovas mantêm contato com os segmentos do comutador, permitindo a condução da corrente elétrica sem interrupções [6][20].



Figura 5.7 – Exemplo de um comutador de corrente contínua.

Fonte: Autor desconhecido.

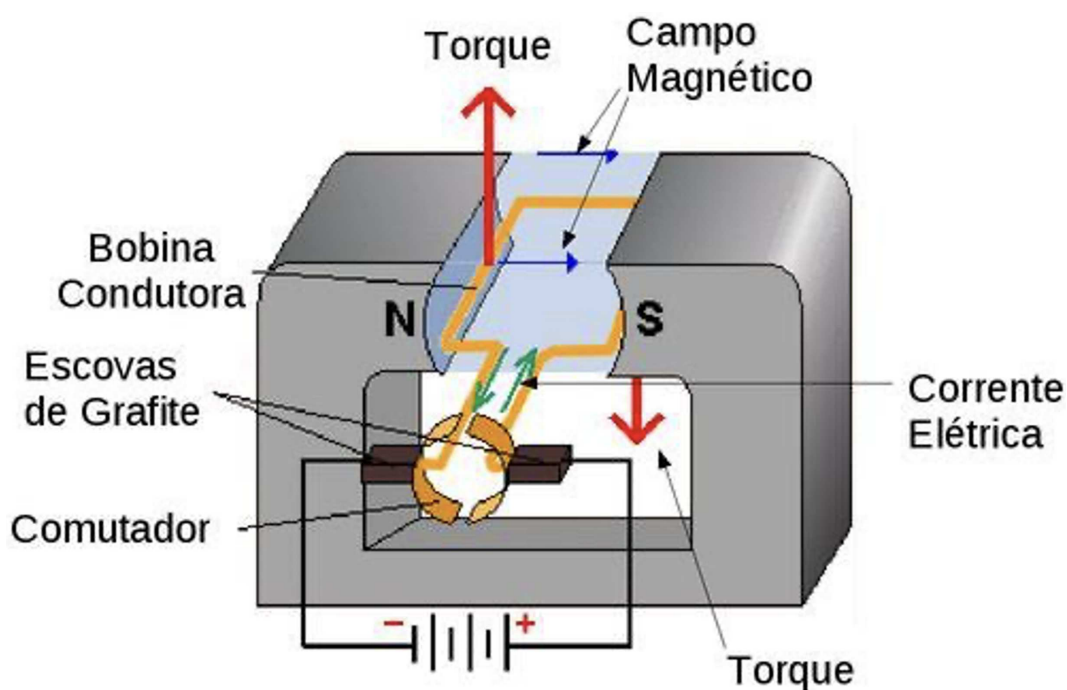


Figura 5.8 – Simulação de um gerador de corrente contínua

Fonte: Autor desconhecido.

Por outro lado, nos geradores de corrente contínua, o comutador atua como um retificador mecânico conforme ilustrado na figura 5.9, convertendo a tensão alternada induzida nas bobinas da armadura em uma tensão contínua pulsante. Nesse caso, ele garante que a corrente fornecida ao circuito externo tenha sempre a mesma polaridade, independentemente da posição do rotor. Portanto, é essencial haver uma sincronização

precisa entre o campo magnético e os contatos das escovas para o desempenho eficiente de um motor ou gerador de corrente contínua [8][13].

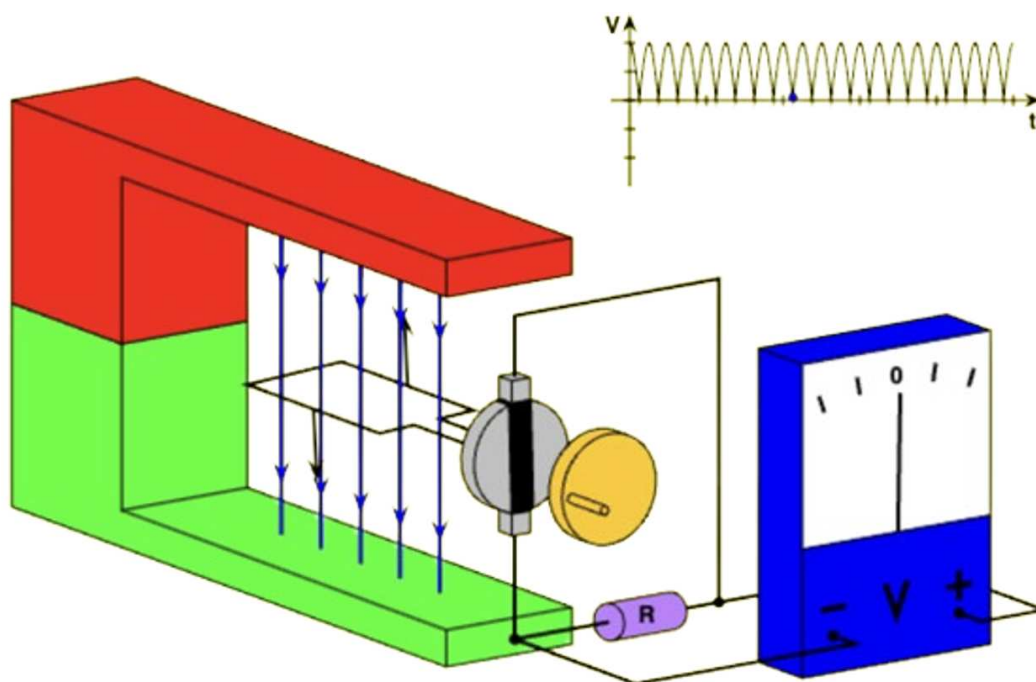


Figura 5.9 – Simulação de um gerador com o comutador.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Atualmente, em máquinas de corrente contínua mais modernas, como os motores sem escovas (Brushless DC Motors - BLDC), a comutação é realizada eletronicamente, sem o uso de comutadores mecânicos e escovas. Esses motores são utilizados em aplicações que exigem maior eficiência, menor manutenção e maior durabilidade. Embora sejam chamados de motores de corrente contínua devido ao comportamento elétrico e à maneira como a corrente é fornecida ao estator, tecnicamente, funcionam de forma semelhante a motores síncronos alimentados por inversores eletrônicos [9].

• Armadura

A armadura, também chamada de rotor, é a parte móvel das máquinas de corrente contínua, onde desempenham um papel crucial no processo de conversão de energia. Em um gerador, a armadura gira devido à aplicação de uma força mecânica externa no eixo, induzindo uma tensão transferida para um circuito externo através do comutador, conforme ilustrado na figura 5.9. Esse mecanismo é essencial para a geração de energia elétrica [6][11]. No caso de um motor, a armadura recebe corrente elétrica de uma fonte externa e, ao interagir com o campo magnético, gera torque, fazendo com que o rotor gire e produza trabalho mecânico [8][14].

O núcleo da armadura é formado por um conjunto de lâminas de aço magnético empilhadas, de modo a minimizar as perdas por correntes parasitas e histerese. Essas lâminas apresentam ranhuras ao longo da superfície externa, onde são inseridos os enrolamentos de cobre da armadura, como mostrado na figura 5.10. As espiras de cobre são isoladas entre si e do núcleo por meio de uma camada de esmalte isolante, assegurando a proteção contra curtos-circuitos [9][19].



Figura 5.10 – Armadura (rotor) da armadura da máquina CC.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com o progresso da eletrônica de potência e das máquinas de corrente alternada em ascensão, as máquinas de corrente contínua estão perdendo espaço devido à sua baixa eficiência em relação às últimas mencionadas, além da necessidade frequente de manutenção para manter em operação. Contudo, o estudo oferecem uma base sólida para compreensão do controle de velocidade e torque. Isso é crucial também para uma melhor compreensão das máquinas mais complexas, síncronas ou assíncronas, que serão discutidas posteriormente.

5.4 EXPERIMENTO 07 - MÁQUINA C.C. COMO MOTOR

Motivação

O estudo das máquinas de corrente contínua (CC) é fundamental para a compreensão dos princípios de conversão de energia elétrica em energia mecânica, com aplicações em sistemas de tração, controle de processos industriais e dispositivos eletromecânicos. No contexto acadêmico e laboratorial, a análise experimental dessas máquinas permite uma abordagem prática para verificar os efeitos de grandezas elétricas como tensão, corrente e resistência no desempenho do motor.

OBJETIVO DO EXPERIMENTO

Este experimento visa mostrar o funcionamento de um motor de corrente contínua, analisando como a variação da corrente, por meio de uma resistência, e a inversão de polaridade afetam sua velocidade e sentido de rotação. A partir da observação e interpretação dos dados, validar conceitos teóricos essenciais, como a relação entre torque, o fluxo magnético e corrente elétrica. Além disso, o experimento permite mostrar a teoria, na prática, proporcionando uma visão mais próxima desses motores em diferentes contextos.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 fonte de alimentação variável com litação de corrente ou pilhas.
- 01 Interruptor
- 01 Modelo didático de um motor DC
- 01 Potenciômetro
- 01 Voltímetro
- 01 Amperímetro

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As máquinas de corrente contínua (CC) possuem um papel essencial na transformação da energia elétrica em energia mecânica, empregadas em diversos campos, como indústrias e laboratórios acadêmicos. O funcionamento dessas máquinas se baseia na interação entre o campo magnético do estator e a corrente elétrica na armadura para gerar um torque eletromagnético proporcional ao produto dessas grandezas [6][8].

A velocidade de rotação do motor CC pode ser controlada por três métodos principais:

- Variação da tensão da armadura: altera diretamente a tensão aplicada ao motor, modificando sua velocidade [6].
- Variação da resistência da armadura: ao inserir uma resistência em série, a corrente é limitada, reduzindo a velocidade[11].
- Variação do fluxo magnético: modificando a corrente no enrolamento de campo, o fluxo magnético pode ser ajustado, impactando a rotação [19].

Além disso, a inversão da polaridade da alimentação altera a direção do campo magnético, o que resulta na mudança do sentido de rotação do motor. Essa característica é utilizada em aplicações industriais e de controle de velocidade, onde a reversão no sentido da máquina é necessária [14].

Os motores CC podem ser classificados conforme a forma de excitação do campo magnético:

- Motores de excitação independente: possuem uma fonte de alimentação separada para o enrolamento de campo, permitindo um controle preciso da velocidade.
- Motores de excitação em derivação (shunt): apresentam uma conexão em paralelo entre o enrolamento de campo e a armadura, proporcionando rotação mais estável.
- Motores de excitação em série: possuem o enrolamento de campo conectado em série com a armadura, gerando torque elevado, sendo amplamente utilizados em sistemas de tração elétrica, como locomotivas e veículos elétricos [9].

O princípio de operação dos motores CC baseia-se na lei de Lorentz, que estabelece que um condutor percorrido por corrente elétrica em um campo magnético experimenta uma força perpendicular a ambos. Esse fenômeno gera torque e promove a rotação do eixo do motor [7]. A equação fundamental que rege esse comportamento é dada por:

$$T = k\phi i(t) \quad (5.1)$$

Onde:

- T é o torque eletromagnético gerado pelo motor;
- k é uma constante característica do motor;
- ϕ é o fluxo magnético concatenado com a armadura;
- $i(t)$ é a corrente na armadura em função do tempo.

A eficiência dessas máquinas é influenciada por diferentes perdas, classificadas em:

- Perdas elétricas: ocorrem na armadura e no enrolamento de campo devido à resistência dos condutores.
- Perdas magnéticas: resultam do fenômeno da histerese e das correntes parasitas no núcleo de ferro.
- Perdas mecânicas: englobam o atrito nos mancais e a resistência ao deslocamento do ar [6];

A análise dessas perdas permite otimizar o desempenho e melhorar a eficiência energética dos motores para diferentes aplicações.

Os motores CC possuem diversas aplicações industriais, incluindo:

- Sistemas de tração elétrica, como locomotivas e veículos elétricos [11][14].
- Processos industriais que requerem controle preciso de velocidade.
- Equipamentos laboratoriais utilizados para experimentação e ensino [5][20].

Neste experimento, será analisada a influência da corrente sobre o motor e sua velocidade, validando os princípios teóricos apresentados. Além disso, será verificado o comportamento do motor diante da inversão de polaridade, permitindo uma análise prática da reversibilidade da rotação.

PROCEDIMENTO PRÁTICO

Este experimento pretende demonstrar, de forma prática, o funcionamento dos motores de corrente contínua (CC). A proposta é mostrar como a variação da corrente elétrica, obtida pela alteração de uma resistência em série no circuito, influencia diretamente a velocidade de rotação do motor. Além disso, o experimento visa comprovar a

reversibilidade do motor por meio da inversão da polaridade da alimentação, confirmando as teorias estudadas.

O primeiro passo é configurar adequadamente a alimentação do circuito. Caso seja utilizada uma fonte externa, é fundamental ajustar a corrente máxima fornecida ao circuito, garantindo o valor necessário para o correto funcionamento do motor e evitando danos ao equipamento.

Em seguida, deve-se adicionar um interruptor em série com o circuito para controlar seu acionamento. Para permitir a variação da corrente, inclui-se um potenciômetro também em série. Por último, conecta-se o motor ao circuito em série.

Para monitorar parâmetros importantes, como corrente e tensão, deve-se inserir um amperímetro em série com o motor e um voltímetro em paralelo com ele, possibilitando realizar as medições necessárias.

Ao ligar o interruptor e ajustar o potenciômetro inicialmente para a menor resistência, observa-se o sentido de rotação do motor e anotam-se os valores iniciais da corrente, da tensão e da resistência do potenciômetro. O experimento deve ser repetido, aumentando-se gradualmente a resistência do potenciômetro, registrando novamente as medições em cada etapa. Posteriormente, a polaridade da alimentação deve ser invertida para confirmar a alteração no sentido de rotação do motor, comprovando o conceito de reversibilidade.

Com base nesses resultados, é possível confirmar a relação direta entre a variação da resistência, a corrente elétrica e o desempenho do motor, validando os conceitos abordados ao longo do estudo. A correlação entre os dados experimentais e os princípios teóricos reforça a importância da análise quantitativa no entendimento do comportamento dos sistemas elétricos. Dessa forma, os experimentos realizados não apenas ilustram os fundamentos da eletricidade e do controle de motores, mas também proporcionam uma visão prática essencial para a aplicação desses conhecimentos em projetos e sistemas do setor elétrico.

5.5 EXPERIMENTO 08 - MOTOR C.C. ACOPLADO A UM GERADOR SÍNCRONO

Motivação

As máquinas de corrente contínua (CC) são fundamentais na conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa, sendo aplicadas em tração elétrica, geração de energia e controle industrial. O acionamento do motor CC acoplado ao gerador CA síncrono permitirá compreender o processo, na prática, analisando os fatores que influenciam no seu funcionamento. Este experimento explora conceitos como excitação, controle de velocidade e geração de energia, fundamentais para diversas aplicações industriais.

OBJETIVO DO EXPERIMENTO

O objetivo deste experimento é demonstrar o funcionamento de uma máquina de corrente contínua (CC) operando como motor, mecanicamente acoplada a um gerador síncrono de corrente alternada (CA). O sistema realiza, inicialmente, a conversão de energia elétrica em mecânica e, posteriormente, converte essa energia mecânica novamente em energia elétrica.

Para isso, será montado um circuito onde o motor CC será alimentado por uma fonte de tensão contínua pulsante, obtida a partir de um variac (varivolt) e uma ponte retificadora monofásica. O motor acionará mecanicamente o gerador CA, transformando energia mecânica em elétrica para alimentar uma carga resistiva composta por lâmpadas halógenas.

Durante o experimento, serão analisados aspectos como a influência da tensão aplicada na velocidade do motor, a relação entre a carga elétrica no gerador e o esforço mecânico exigido do motor, além da variação das correntes e tensões no sistema. Será possível observar também como o brilho das lâmpadas conectadas ao gerador varia em função da tensão gerada.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Motor de corrente contínua
- 01 Gerador de corrente contínua
- 02 Varivolts monofásicos
- 02 Pontes retificadoras monofásicas KBPC2510

- 04 Multímetros
- 01 Kit de lâmpadas halógenas (como carga resistiva)
- Cabos para conexão

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As máquinas elétricas desempenham um papel fundamental na conversão de energia, permitindo transformar energia elétrica em movimento mecânico ou vice-versa. No caso das máquinas de corrente contínua (CC), essa conversão ocorre pela interação entre um campo magnético e uma corrente elétrica que circula na armadura. Seu princípio operacional baseia-se na Lei de Lorentz, segundo a qual um condutor percorrido por corrente elétrica, inserido em um campo magnético, sofre uma força mecânica perpendicular, resultando em movimento [6][11].

Quando as máquinas CC operam como geradores, é possível observar a aplicação dos princípios da lei de Faraday. Nesse caso, o movimento mecânico rotativo aplicado ao eixo resulta em uma tensão induzida na armadura, promovendo a conversão da energia mecânica em energia elétrica, processo fundamental em diversas aplicações industriais e sistemas de geração de energia [8][14].

Essas máquinas podem ser classificadas conforme a configuração dos seus enrolamentos de campo magnético, dividindo-se em:

- **Excitação Independente:** Neste tipo de máquina, o enrolamento de campo é alimentado por uma fonte de tensão externa independente da armadura. Esse tipo de excitação permite um controle mais preciso do fluxo magnético e, conseqüentemente, da velocidade e do torque da máquina. É comumente utilizado em processos industriais que exigem controle rigoroso de velocidade, como em sistemas de laminação e controle de processos químicos. Sua principal vantagem é a estabilidade da tensão gerada, enquanto a desvantagem está na necessidade de uma fonte de alimentação adicional para o campo [9][19].
- **Excitação em Derivação (Shunt):** Nessa configuração, o enrolamento de campo é ligado em paralelo com a armadura, permitindo que a corrente de campo seja relativamente constante. Máquinas desse tipo possuem velocidade quase constante e são utilizadas em aplicações como ventiladores industriais e acionamentos de bombas. Sua principal vantagem é a manutenção de uma velocidade estável sob diferentes

condições de carga. No entanto, sua desvantagem está na menor capacidade de fornecer torque elevado em partidas [6][13].

- **Excitação Série:** O enrolamento de campo está ligado em série com a armadura, fazendo com que a corrente que circula pelo campo seja a mesma que alimenta a carga. Essa configuração proporciona um alto torque de partida, sendo ideal para aplicações como tração elétrica em locomotivas e veículos elétricos. Entretanto, a principal desvantagem é a dificuldade em controlar a velocidade, pois qualquer variação na carga pode provocar oscilações significativas [11][20].
- **Excitação Composta:** Essa configuração combina as características das máquinas shunt e série, o que permite o controle de velocidade e do torque. Existem dois tipos: composta longa, onde o enrolamento shunt é conectado antes do enrolamento série, e composta curta, onde o enrolamento shunt é conectado depois do enrolamento série. Essa configuração é utilizada em elevadores, guindastes e sistemas de acionamento industrial onde a estabilidade da velocidade e um torque adequado são necessários [8][19].

Apesar do crescente uso das máquinas de corrente alternada (CA) na indústria, as máquinas CC ainda possuem relevância significativa em aplicações que exigem controle preciso de velocidade e torque. São amplamente utilizadas em laboratórios, tração elétrica, controle industrial e geração distribuída de energia. Além disso, podem operar em modo regenerativo, podendo devolver energia ao sistema, o que é essencial em soluções sustentáveis e de eficiência energética [9].

Entretanto, apresentam algumas desvantagens frente às máquinas CA, como necessidade frequente de manutenção devido ao desgaste das escovas e do comutador, maior custo de fabricação e menor eficiência em aplicações de alta potência [6][13].

No contexto industrial e comercial, os motores CC são aplicados em sistemas de tração elétrica, como locomotivas, metrô e veículos elétricos, graças ao alto torque inicial e controle apurado de velocidade. Também são utilizados em sistemas de elevação, como elevadores e guindastes, garantindo segurança e eficiência operacional [14]. Máquinas rotativas, como tornos e fresadoras, utilizam motores CC pela precisão exigida no torque e velocidade. Além disso, pequenos geradores CC são frequentemente empregados em sistemas de backup e geração distribuída, incluindo fontes renováveis. No ambiente acadêmico, essas máquinas são amplamente exploradas para fins educacionais e experimentais [5][20].

Assim, as máquinas CC continuam essenciais em diversas aplicações, com destaque na versatilidade e precisão no controle de sistemas eletromecânicos.

PROCEDIMENTO PRÁTICO

O experimento consiste na operação conjunta de uma máquina de corrente contínua (CC) e um gerador assíncrono (CA), acoplados mecanicamente. O motor CC está conectado em série e é alimentado por uma fonte de tensão contínua pulsante, gerada a partir de um varivolt e uma ponte retificadora monofásica. O gerador, por sua vez, está configurado em uma ligação estrela-paralelo, permitindo a regulação da tensão de saída por meio do controle de sua excitação.

A figura 5.11 apresenta o conjunto de máquinas utilizado no experimento. O motor CC (à direita) aciona mecanicamente o gerador CA (à esquerda), convertendo energia elétrica em energia mecânica, que é posteriormente convertida novamente em energia elétrica pelo gerador. Esse processo ilustra o princípio básico da conversão eletromecânica de energia, fundamental para o funcionamento de sistemas de geração elétrica.

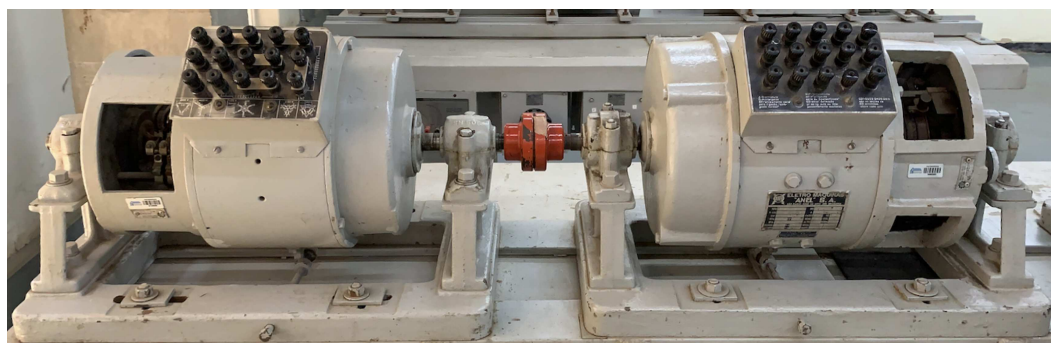


Figura 5.11 – Gerador síncrono acoplado um motor de corrente contínua.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O circuito de alimentação do motor é representado na figura 5.12. A saída do varivolt está conectada à ponte retificadora, que converte a tensão alternada em tensão contínua pulsante. O motor CC, operando em configuração série, é alimentado por esse circuito para acionar o gerador. A conexão do estator e do rotor do motor está ilustrada na figura 5.12.

Na configuração série do motor CC, a corrente que circula pelo enrolamento do estator é a mesma que atravessa a armadura. Isso resulta em um campo magnético intenso, proporcionando um torque de partida elevado. Entretanto, essa configuração também implica que a velocidade do motor depende diretamente da carga mecânica aplicada ao eixo. Com baixa carga, a corrente no circuito diminui, reduzindo a intensidade do campo magnético e levando a um aumento na velocidade do motor. Por outro lado, quando a carga no gerador aumenta, o motor consome mais corrente, resultando em um campo magnético mais forte e em uma redução na velocidade do motor.

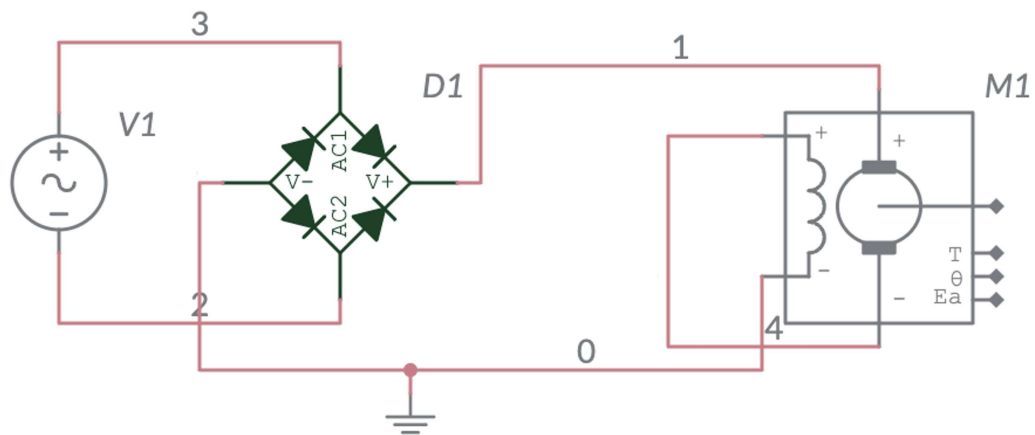


Figura 5.12 – Diagrama esquemático de montagem do motor de corrente contínua.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

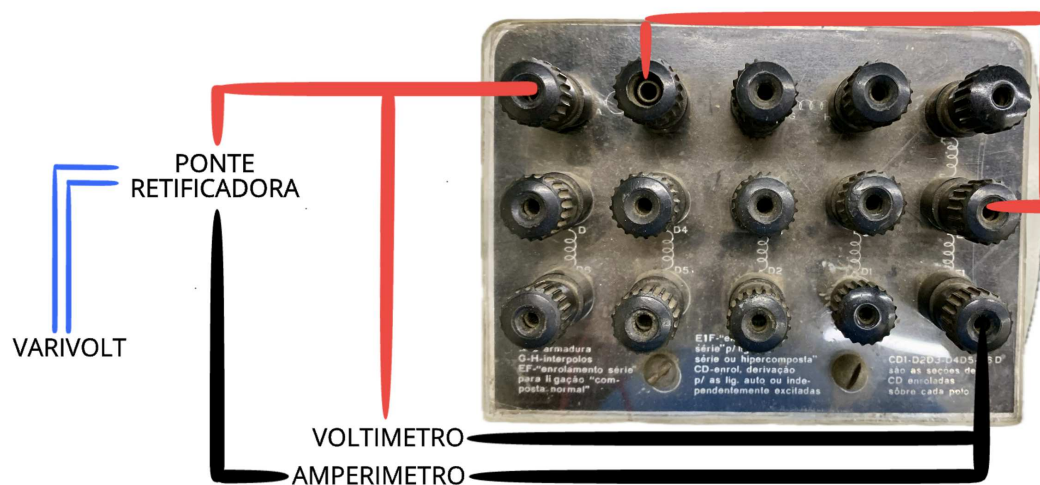


Figura 5.13 – Diagrama de ligação do motor de corrente contínua.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A figura 5.14 mostra o diagrama de ligação do gerador síncrono (CA), cuja excitação é fornecida por outro varivolt e uma ponte retificadora monofásica. A tensão gerada pelo gerador é utilizada para alimentar uma carga resistiva composta por lâmpadas halógenas. Como o gerador está configurado em estrela-paralelo, a tensão de saída é distribuída de maneira equilibrada entre as fases, além de um ponto comum (neutro).

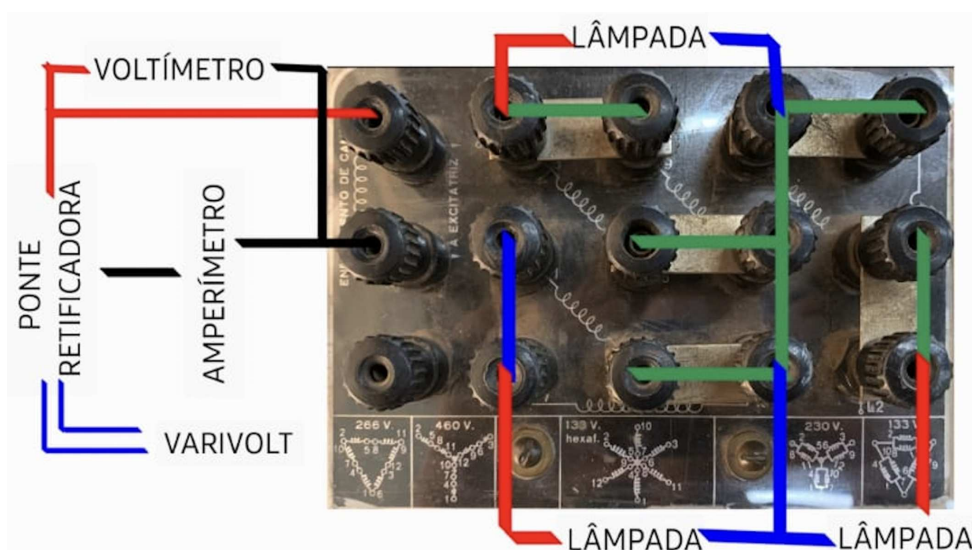


Figura 5.14 – Diagrama de ligação do gerador síncrono.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O efeito das modificações na alimentação do motor reflete diretamente na operação do gerador. Um aumento na tensão aplicada ao motor resulta em maior velocidade de rotação do eixo, elevando a tensão gerada e, conseqüentemente, o brilho das lâmpadas conectadas à saída do gerador. Da mesma forma, a variação da excitação do gerador permite analisar a influência do campo magnético na tensão gerada e na corrente fornecida à carga.

Este experimento pode ser comparado ao funcionamento de uma usina hidrelétrica. No contexto da usina, a energia potencial da água armazenada em um reservatório é convertida em energia cinética ao passar por turbinas hidráulicas, que, por sua vez, acionam geradores elétricos. De maneira análoga, no experimento, a energia elétrica fornecida ao motor CC é convertida em energia mecânica, que é posteriormente transformada novamente em eletricidade pelo gerador. Além disso, assim como na usina hidrelétrica é possível controlar a vazão da água para ajustar a geração de energia, neste experimento o controle da excitação do gerador e da alimentação do motor permite regular a tensão e a corrente geradas.

Dessa forma, o experimento mostra de maneira prática o processo de conversão de energia elétrica em mecânica e sua reconversão em energia elétrica, permitindo uma análise do comportamento dos componentes envolvidos e das perdas inerentes ao processo.

5.6 MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE ALTERNADA

As máquinas elétricas de corrente alternada (CA) desempenham um papel essencial na conversão de energia elétrica em energia mecânica, sendo amplamente empregadas na indústria, comércio e residências devido à sua eficiência e confiabilidade [6][11]. A escolha entre os diferentes tipos de motores CA depende das características operacionais exigidas, como controle de velocidade, potência, eficiência e tipo de carga acionada [8]. Essas máquinas podem ser classificadas principalmente como motores síncronos e motores de indução, ambos fundamentados no princípio do campo magnético girante, essencial para seu funcionamento.

O campo magnético girante é uma característica das máquinas elétricas CA. Ele ocorre quando um sistema trifásico de correntes senoidais defasadas em 120° alimenta os enrolamentos do estator, criando um campo magnético que gira a uma velocidade constante, conhecida como velocidade síncrona [19]. Esse campo interage com o rotor, induzindo correntes elétricas e gerando torque. A velocidade síncrona pode ser calculada pela equação:

$$N_S = \frac{120f}{P} \quad (5.2)$$

onde:

- N_S é a velocidade síncrona (em RPM);
- f é a frequência da rede elétrica (em Hz);
- P é o número de polos do motor.

Os motores de indução operam a uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade síncrona devido ao escorregamento, sendo a diferença percentual entre a velocidade síncrona e a velocidade real do rotor [14]. Esse fenômeno é necessário para ocorrer a indução eletromagnética no rotor, gerando o torque essencial ao funcionamento do motor. O escorregamento é dado por:

$$S = \frac{N_S - N_R}{N_S} \times 100 \quad (5.3)$$

onde:

- S é o escorregamento (%);
- N_R é a velocidade do rotor (em RPM);
- N_S é a velocidade síncrona (em RPM)

Os motores CA podem ser classificados como motores monofásicos e trifásicos, dependendo da alimentação elétrica utilizada.

Os motores monofásicos são comumente utilizados em aplicações de baixa potência, como eletrodomésticos, ferramentas elétricas e pequenos ventiladores. Para criar um campo magnético girante no estator, esses motores utilizam dispositivos auxiliares, como capacitores ou enrolamentos adicionais [20]. Embora sejam práticos e fáceis de instalar, apresentam menor eficiência e um torque de partida reduzido em comparação aos motores trifásicos.

Os motores trifásicos, por sua vez, são os mais utilizados em aplicações industriais devido à sua alta eficiência e capacidade de fornecer torque elevado. Eles são alimentados por uma rede trifásica, o que permite a criação de um campo magnético girante natural no estator, sem necessidade de capacitores ou enrolamentos auxiliares [11]. Esses motores podem ser subdivididos em motores síncronos e motores de indução.

Os motores de indução trifásicos podem ser classificados em gaiola de esquilo e rotor bobinado. Os motores de gaiola de esquilo são os mais comuns e possuem um rotor formado por barras condutoras curtas conectadas por anéis, sendo altamente confiáveis e de baixo custo. São empregados em aplicações como bombas, compressores e esteiras transportadoras. Já os motores de rotor bobinado, também chamados de motores de anéis coletores, possuem enrolamentos conectados a escovas e resistências externas, permitindo controle preciso da velocidade e do torque, sendo utilizados em elevadores e máquinas de grande porte [19].

As máquinas síncronas operam a uma velocidade fixa, determinada pela frequência da rede elétrica. Diferentemente das máquinas de indução, seu rotor precisa ser excitado com corrente contínua para gerar um campo magnético e sincronizar com o campo girante do estator. Esses motores são empregados em processos que exigem precisão de velocidade, como geradores elétricos e grandes compressores industriais [8].

A placa de identificação de um motor elétrico contém informações essenciais sobre suas características elétricas, mecânicas e operacionais. Esses dados são fundamentais para a correta instalação, operação e manutenção do equipamento. A tabela abaixo resume os principais parâmetros de um motor elétrico:

Tabela 5.2 – Principais parâmetros de um motor elétrico

Parâmetro	Unidade	Descrição
P_{nom}	kW ou HP	Indica a potência máxima contínua
V_{nom}	V	Especifica a tensão de alimentação
I_{nom}	A	Indica a corrente consumida sob carga
f_{nom}	Hz	Normalmente 50 Hz ou 60 Hz
$\cos \phi$	-	Relação entre potência ativa e aparente
P	-	Número de polos, determina a velocidade de rotação
Classe de isolamento	-	Nível de proteção contra temperatura
Grau de proteção	IP	Proteção contra poeira e umidade
η	(%)	Eficiência na conversão de energia
I_{part}	A	Corrente consumida na partida
Método de resfriamento	-	Meio de resfriamento do motor

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Motores CA podem ser acionados por diferentes métodos, incluindo partida direta, estrela-triângulo, chave compensadora, soft-starter e inversores de frequência, dependendo da aplicação e características do motor [9][13].

- Partida direta: método mais simples e comum, utilizado em motores de baixa potência. O motor é conectado diretamente à rede elétrica, sofrendo um pico de corrente elevado na partida.
- Partida estrela-triângulo: reduz a corrente de partida ao conectar inicialmente os enrolamentos do motor em configuração estrela e, após atingir determinada velocidade, mudar para triângulo. Utilizado em motores de médio porte.
- Chave compensadora: reduz a tensão de partida por meio de um autotransformador. Aplicada em sistemas de bombeamento e acionamentos industriais.
- Soft-starter: dispositivo eletrônico que controla gradualmente a tensão aplicada ao motor durante a partida, reduzindo impactos elétricos e mecânicos. Utilizado em transportadores e grandes ventiladores industriais.

- Inversores de frequência: permitem o controle contínuo da velocidade do motor por meio da variação da frequência da alimentação. São amplamente utilizados na indústria para otimização do consumo de energia e controle de processos automatizados.

A eficiência dos motores CA é um fator determinante em aplicações industriais e comerciais. As perdas podem ser classificadas em:

- Perdas elétricas: devidas à resistência dos enrolamentos do estator e do rotor.
- Perdas magnéticas: originadas pela histerese e correntes parasitas no núcleo do motor.
- Perdas mecânicas: causadas pelo atrito nos mancais e pela resistência ao deslocamento do ar.

A eficiência do motor pode ser determinada pela equação:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{entrada}}} \times 100 \quad (5.4)$$

onde:

- η é a eficiência (%);
- $P_{\text{útil}}$ é a potência útil fornecida pelo motor;
- P_{entrada} é a potência total consumida.

Com os avanços tecnológicos, os motores elétricos têm se tornado mais eficientes, reduzindo perdas e aumentando a confiabilidade dos sistemas elétricos modernos. O estudo contínuo dessas máquinas é essencial para o desenvolvimento sustentável e para a otimização dos processos industriais.

5.7 EXPERIMENTO 9 – PARTIDA DIRETA DE MOTORES TRIFÁSICOS

Motivação

A partida direta é um dos métodos mais simples e eficientes para o acionamento de motores trifásicos, sendo amplamente utilizada na indústria e em instalações comerciais. Sua aplicação é essencial em equipamentos como ventiladores, bombas e compressores, garantindo rápido acionamento e operação confiável. Este experimento ajuda a compreender

os princípios básicos desse tipo de acionamento, além da importância dos dispositivos de proteção para evitar danos ao sistema.

OBJETIVO DO EXPERIMENTO

Este experimento pretende mostrar, de forma prática, como funciona a partida direta de motores trifásicos, ligando o motor diretamente à rede elétrica por meio de um circuito de comando e potência. Para garantir que o motor continue funcionando sem precisar manter o botão de partida pressionado, será utilizado um contato de selo. Além disso, o experimento mostra a importância dos dispositivos de proteção, como relés térmicos e fusíveis, que ajudam a evitar sobrecargas e curtos-circuitos, protegendo tanto o motor quanto a rede elétrica.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Motor trifásico;
- 04 Relé térmico;
- 02 Contatores;
- 04 Fusíveis de proteção;
- 01 Chave normalmente aberta;
- 01 Chave normalmente fechada;
- 02 Sinalizadores luminosos;
- Cabos para conexão;

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partida direta de motores trifásicos é um dos métodos mais simples e tradicionais de acionamento de motores elétricos. Esse método consiste na conexão direta do motor à rede elétrica, sem o uso de dispositivos que limitem ou reduzam a corrente de partida. Devido à simplicidade e ao baixo custo, é amplamente utilizado em indústrias, oficinas e instalações comerciais, especialmente para motores de pequeno e médio porte [22][23].

Na partida direta, o motor trifásico é conectado diretamente à rede elétrica mediante um contator. Quando acionado, esse dispositivo permite a passagem imediata

da corrente elétrica para o motor. Uma grande vantagem desse sistema é a rapidez e simplicidade no acionamento, porém tem uma elevada corrente de partida, que pode alcançar de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal do motor [6][11], conforme mostra a figura 5.15. Essa corrente elevada pode causar impactos na rede elétrica, como quedas de tensão e interferências em equipamentos próximos.

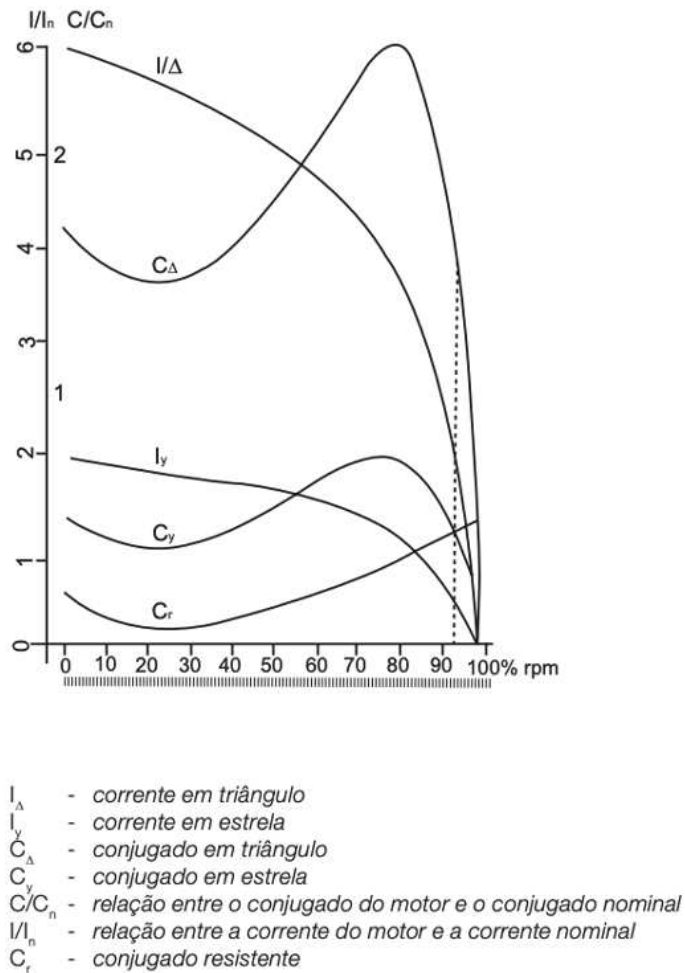


Figura 5.15 – Curva característica da partida direta.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Por essa razão, a partida direta é mais adequada para motores de potência relativamente baixa, geralmente até 5 cv, dependendo das normas da concessionária de energia elétrica. Para motores maiores, recomendam-se métodos como a partida estrela-triângulo ou soft starters, a fim de minimizar os efeitos negativos sobre a rede elétrica [8][14].

Para garantir a segurança do circuito e do usuário, o circuito de partida direta inclui diversos componentes essenciais, desde o acionamento até a proteção do motor. O contator é o dispositivo eletromecânico responsável por ligar e desligar o motor de forma

segura e eficiente [23]. Ele é composto por uma bobina e contatos principais e auxiliares, conforme ilustrado na figura 5.16. Quando energizada, a bobina fecha os contatos principais, permitindo a passagem de corrente elétrica para o motor.

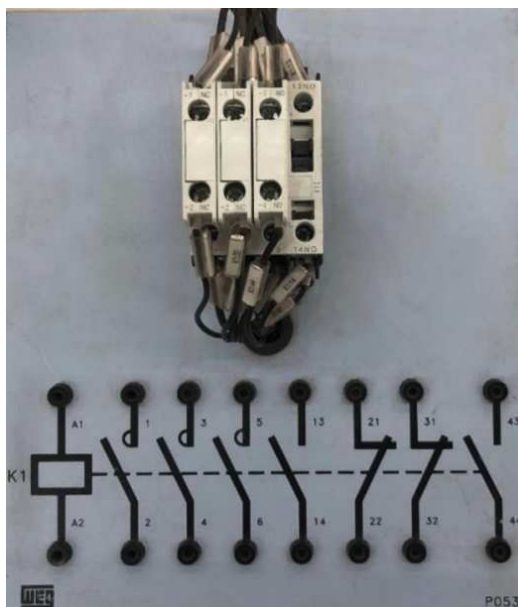


Figura 5.16 – Módulo contator.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Neste módulo, os contatos de 1 a 6 (onde os ímpares são entradas de energia, e os pares a saída para o motor) são destinados à parte de força, sendo responsáveis pelo acionamento direto do motor. Já os demais contatos são denominados auxiliares e utilizados para controle e sinalização. Os contatos auxiliares são utilizados para controle e sinalização, sendo classificados em normalmente abertos (NA) e normalmente fechados (NF)[23].

O Relé térmico é outro componente crucial, protegendo o motor contra sobrecargas por meio de elementos bimetálicos sensíveis ao aumento de temperatura causado pelo excesso de corrente. Ao atingir um limite seguro, o Relé interrompe o circuito para evitar danos ao motor [22].

Neste experimento, utiliza-se um Relé térmico tripolar, que protege todas as fases do circuito. Além disso, ele possui contatos auxiliares, identificados como 97/98 (NA) e 95/96 (NF), usados para controle e segurança do sistema elétrico.

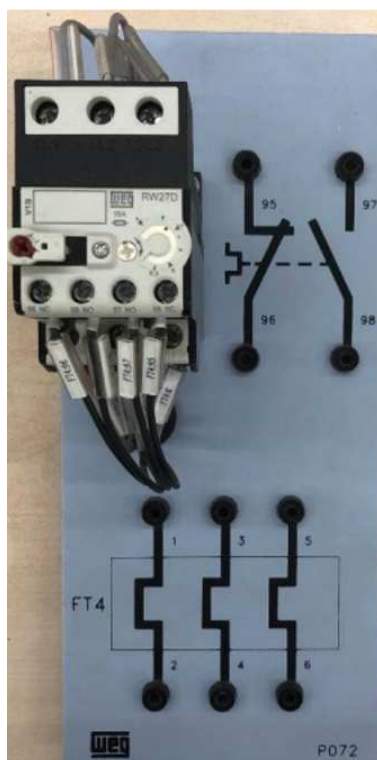


Figura 5.17 – Módulo de relé de proteção.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O acionamento manual é realizado por botões de comando, como ilustrado na figura 5.18. O botão "liga"(NA) energiza a bobina do contator, enquanto o botão "desliga"(NF) interrompe essa energia, desligando o motor de forma segura [23].

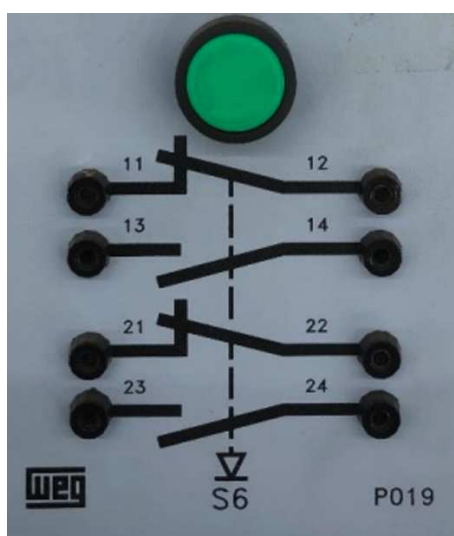


Figura 5.18 – Módulo de botão com chaves NA e NF.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O módulo de sinalização, representado na figura 5.19, é utilizado para indicar a condição operacional do motor e alertar sobre possíveis falhas. Sinalizadores luminosos de diferentes cores podem indicar condições específicas de operação [23].

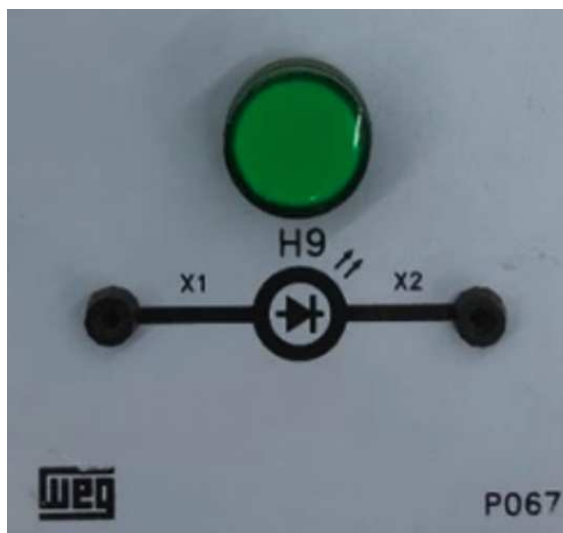


Figura 5.19 – Módulo de sinalização.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A partida direta é recomendada para motores de pequena e média potência e é utilizada em compressores de ar, bombas hidráulicas e ventiladores industriais. Este método é bastante eficiente e econômico em instalações que possuem uma rede elétrica sólida capaz de suportar correntes elevadas sem oscilações significativas [22].

Apesar das restrições relacionadas à alta corrente de partida e aos impactos associados, a facilidade e a confiança da partida direta tornam esse método uma opção viável em várias situações. Para motores maiores, as normas estabelecem o uso de alternativas como partida estrela-triângulo e soft starters, a fim de reduzir o impacto na rede elétrica e aumentar a eficiência operacional [8][11].

PROCEDIMENTO PRÁTICO

Antes de iniciar este experimento, é fundamental garantir a segurança de todos os envolvidos e proteger os equipamentos utilizados. Certifique-se de que a bancada esteja completamente desenergizada durante toda a montagem dos circuitos, evitando risco de choques elétricos ou danos aos componentes. Somente após conferir todas as conexões e assegurar que estejam corretas e seguras é que a bancada poderá ser energizada. O ato de energizar a bancada deve ser a última etapa do processo, realizada com cautela e atenção aos procedimentos estabelecidos. Utilize sempre equipamentos de proteção individual

(EPI), como luvas isolantes, óculos de segurança e calçados adequados, além de seguir rigorosamente todas as normas técnicas e recomendações de segurança aplicáveis.

A partida direta consiste em um método de ligação do motor trifásico diretamente à rede elétrica. Esse é o método mais simples de acionamento, pois não utiliza dispositivos que limitem a corrente de partida. Assim, o primeiro passo é conectar o motor à alimentação elétrica, ilustrada na figura 5.20.

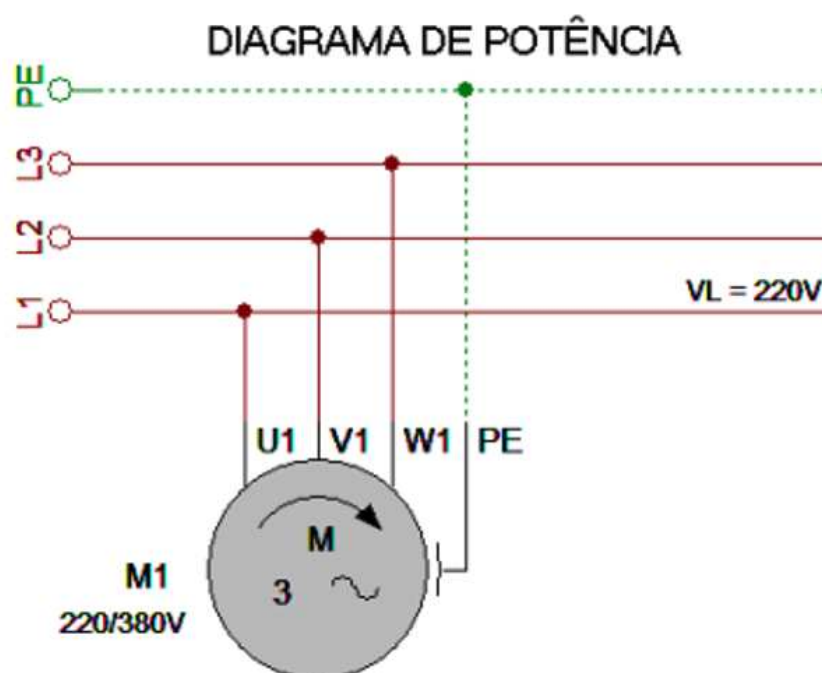


Figura 5.20 – Ligação do motor a rede elétrica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

No entanto, a ligação direta não permite controle do funcionamento do motor. Para resolver este problema, é utilizado um contator (K1), dispositivo eletromecânico que possibilita ligar e desligar o motor remotamente. O contator possui uma bobina de acionamento (terminais A1 e A2) e contatos principais, responsáveis por liberar ou interromper a corrente elétrica para o motor, como na figura 5.21.

Para permitir o acionamento manual, são usados dois botões: um botão de desligar (S0 - NF), normalmente fechado, que interrompe o circuito quando pressionado, e um botão de ligar (S1 - NA), normalmente aberto, que energiza o contator e liga o motor ao ser pressionado, conforme figura 5.22.

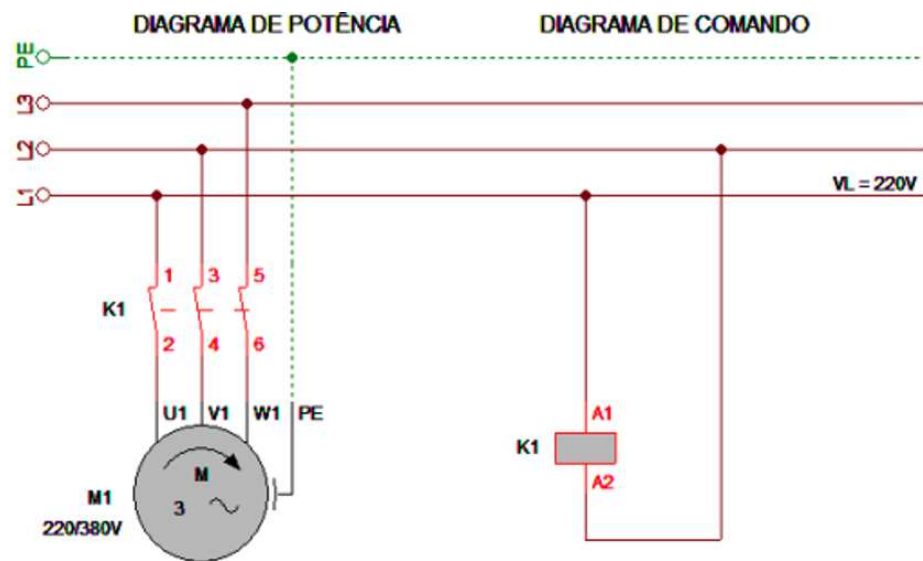


Figura 5.21 – Ligação do motor por meio do contator.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Entretanto, ao soltar o botão S1, o motor desligaria imediatamente. Para manter o motor funcionando sem segurar continuamente o botão, é utilizado o contato de selo. Este contato auxiliar do contator mantém a bobina energizada, garantindo que o motor continue ligado até que o botão de parada seja acionado, como ilustrado na figura 5.23.

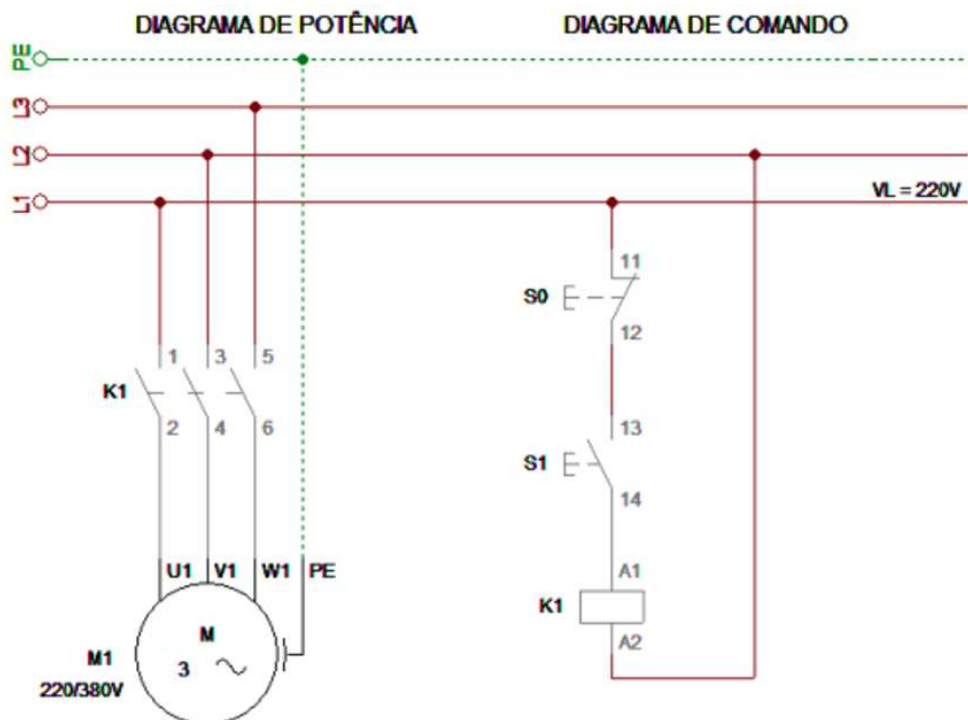


Figura 5.22 – Adição dos botões ao diagrama de comando.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

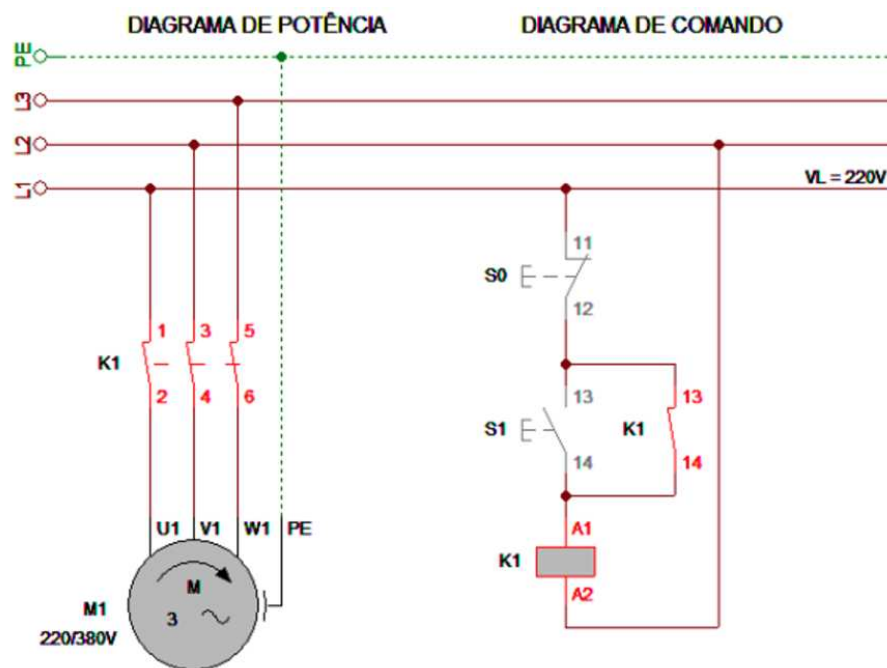


Figura 5.23 – Adição do comando selo no circuito.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para facilitar a operação e aumentar a segurança, são utilizadas duas luzes de sinalização: uma lâmpada vermelha (H1) indicando que o motor está desligado e uma lâmpada verde (H3) indicando que o motor está ligado. Os contatos auxiliares do contator são utilizados para controlar essas lâmpadas. Quando o motor está desligado, a lâmpada vermelha acende; quando ligado, a lâmpada verde acende, conforme as Figuras 5.24 e 5.25.

A corrente de partida de motores trifásicos pode alcançar 6 a 8 vezes a corrente nominal, causando quedas de tensão e possíveis danos ao motor. Para proteger o sistema, são utilizados dispositivos como o Relé térmico e fusíveis.

O Relé térmico protege o motor contra sobrecargas prolongadas. Ele possui uma lâmina bimetálica que se aquece com a corrente elétrica. Se o motor operar acima do limite seguro, o Relé desliga automaticamente o circuito ao abrir seu contato auxiliar (95/96). Isso evita superaquecimento e possíveis danos ao motor. Após a atuação do relé, é necessário resetá-lo antes de religar o motor, ilustrada na figura 5.26.

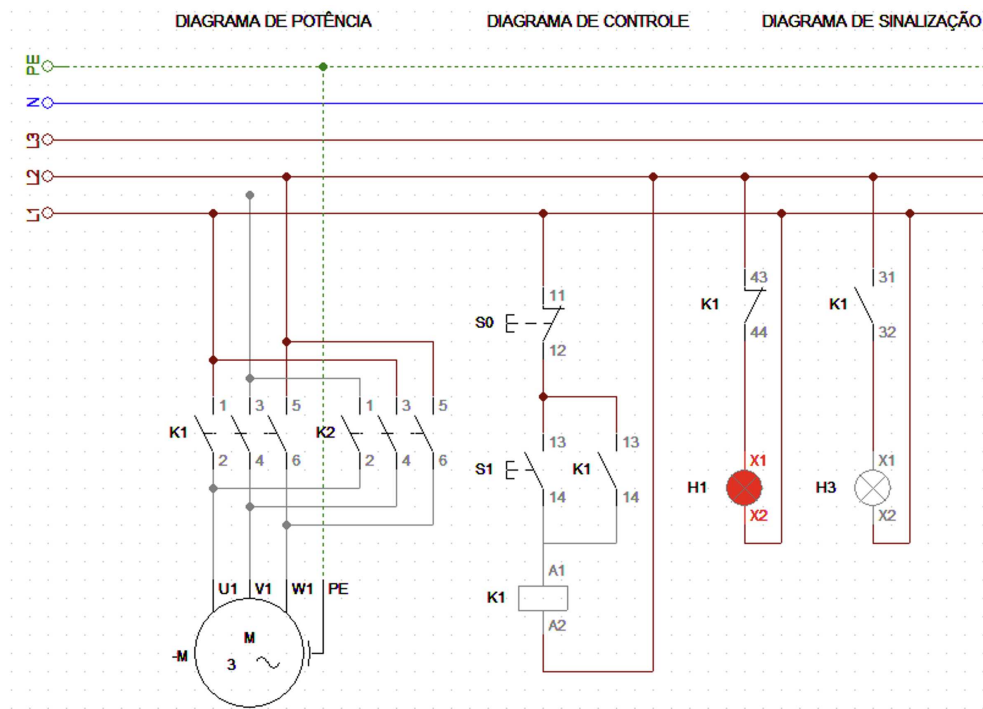


Figura 5.24 – Circuito básico com motor desligado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

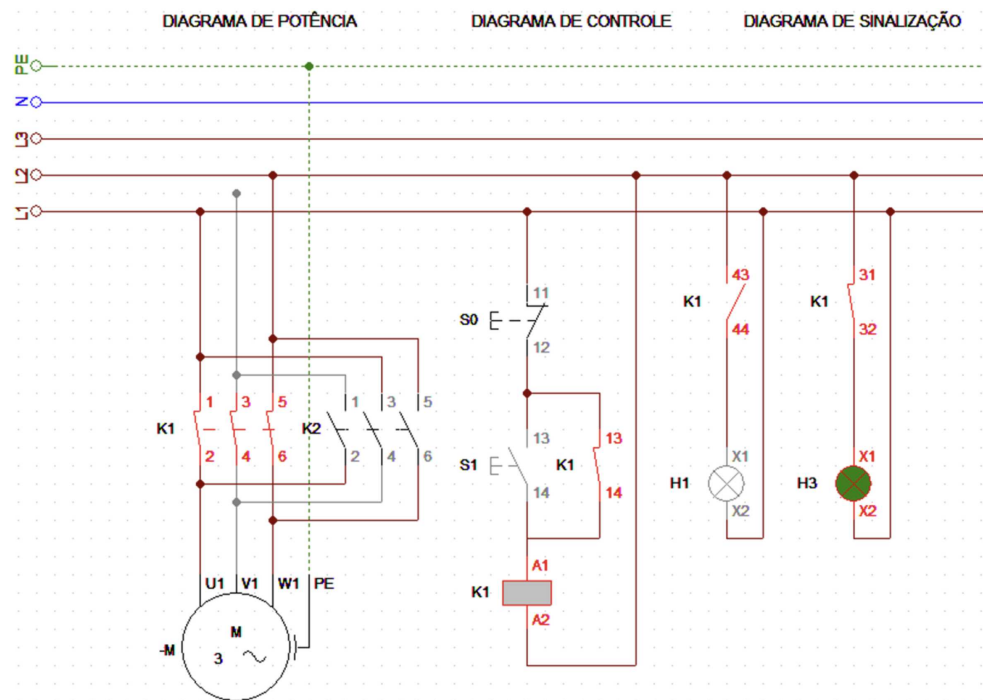


Figura 5.25 – Circuito básico com motor ligado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os fusíveis protegem contra curtos-circuitos e sobrecorrentes bruscas, rompendo-se

imediatamente ao exceder o limite suportado e interrompendo a corrente elétrica para evitar danos, necessitando de substituição após atuação, demonstrado na figura 5.27.

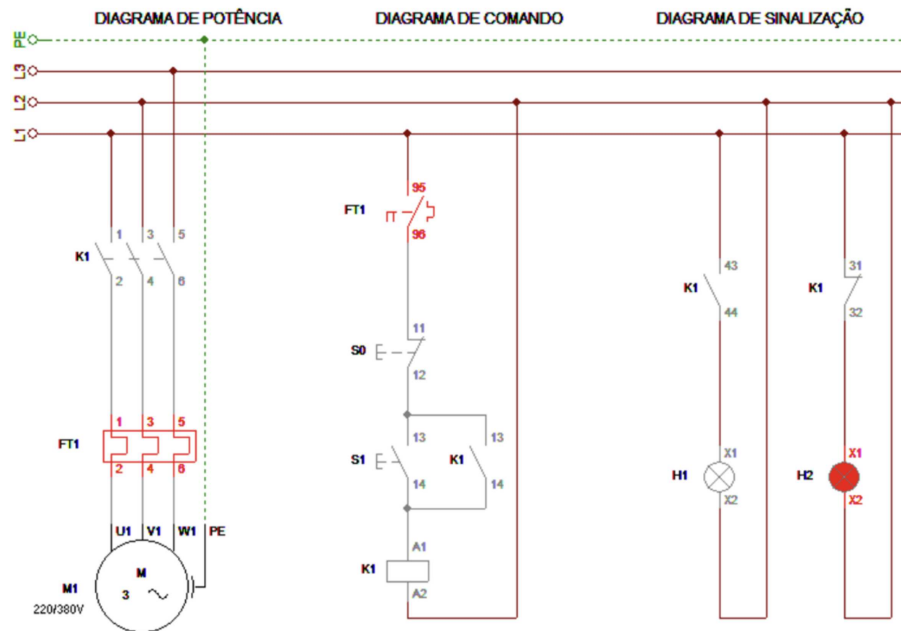


Figura 5.26 – Adição dos relés térmicos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

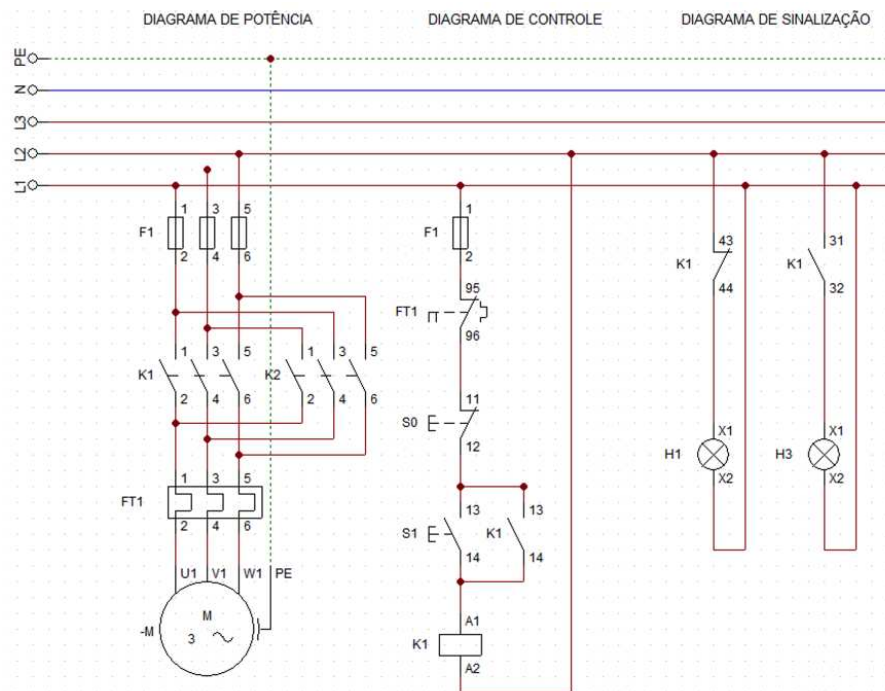


Figura 5.27 – Diagrama com sistema de potência, controle e sinalização.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.8 EXPERIMENTO 10 – PARTIDA DE MOTOR TRIFÁSICO COM REVERSÃO

Motivação

O controle do sentido de rotação de motores trifásicos é essencial em processos industriais que exigem movimentação bidirecional, como esteiras, guindastes e elevadores. A partida com reversão permite essa alternância de forma automatizada e segura, utilizando contadores intertravados para evitar acionamentos simultâneos. Compreender esse sistema é fundamental para a aplicação em automação e comandos elétricos.

OBJETIVO DO EXPERIMENTO

Este experimento procura demonstrar a partida com reversão de um motor trifásico, permitindo sua rotação nos sentidos horário e anti-horário. Para isso, será implementado um circuito utilizando dois contadores intertravados, garantindo que apenas um deles esteja ativado por vez, prevenindo curtos-circuitos.

O circuito será testado e analisado, verificando seu comportamento em diferentes condições de acionamento, a fim de explicar o princípio da reversão de rotação e sua aplicação prática na indústria.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- 01 Motor trifásico;
- 04 Relé térmico;
- 02 Contadores;
- 04 Fusíveis de proteção;
- 01 Chave normalmente aberta;
- 01 Chave normalmente fechada;
- 02 Sinalizadores luminosos;
- Cabos para conexão;

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partida com reversão de motores trifásicos é um dos métodos mais utilizados na indústria para alterar o sentido de rotação de um motor elétrico. Esse método consiste na troca de duas fases da alimentação do motor, fazendo com que ele alterne entre os sentidos horário e anti-horário [5][23].

Por sua simplicidade e eficiência, esse sistema é amplamente aplicado em equipamentos industriais, como esteiras transportadoras, guindastes, elevadores e máquinas operatrizes, onde há necessidade de mudança de direção de movimento de forma rápida e segura [8][11].

O princípio da reversão está na inversão do campo magnético gerado no estator do motor, o que faz com que o rotor mude sua direção de rotação. Esse processo pode ser realizado de forma manual ou automática, sendo mais comum o uso de dois contatores intertravados para garantir que apenas um deles esteja ativado por vez, evitando curto-circuito[5].

No circuito de partida com reversão, o motor trifásico é acionado e controlado por meio desses dois contatores, que alternam a sequência de fases. Quando um dos contatores é ativado, ele permite a passagem de corrente para o motor em um determinado sentido. Para inverter a rotação, o primeiro contator é desligado e o segundo é acionado, trocando duas das três fases da alimentação. Esse processo ocorre de forma segura e controlada com o uso de intertravamento elétrico e mecânico, impedindo que ambos os contatores sejam acionados ao mesmo tempo, o que causaria um curto-circuito [23].

PROCEDIMENTO PRÁTICO

Neste experimento, será realizado o acionamento de um motor trifásico com reversão, permitindo que ele gire nos sentidos horário e anti-horário. Para implementar a partida com reversão, o circuito de partida direta será utilizado como base, conforme ilustrado na figura 5.28.

Na partida direta, o acionamento ocorre por meio do contator K1, que libera a corrente elétrica para o motor. Porém, para inverter o sentido de rotação, é necessário adicionar um segundo contator (K2) ao circuito, como mostrado na figura 5.29.

O contator K2 inverte a sequência de fases do motor, trocando duas das três fases da alimentação e fazendo com que o motor gire na direção oposta.

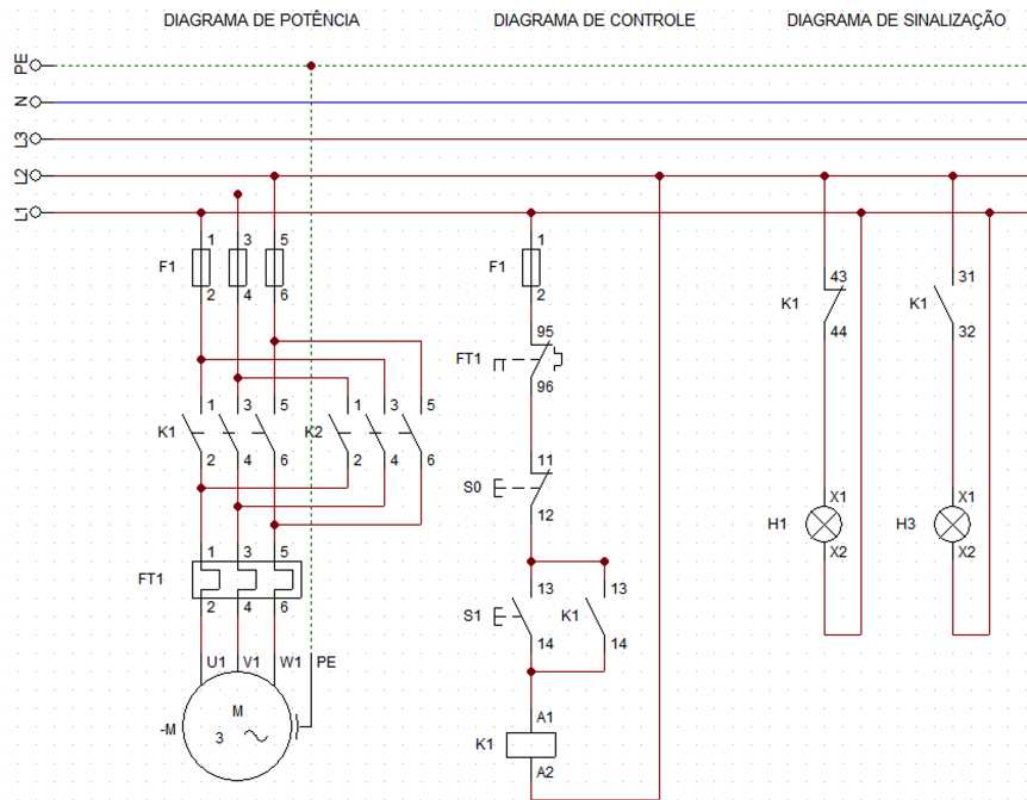


Figura 5.28 – Diagrama do circuito de partida direta.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

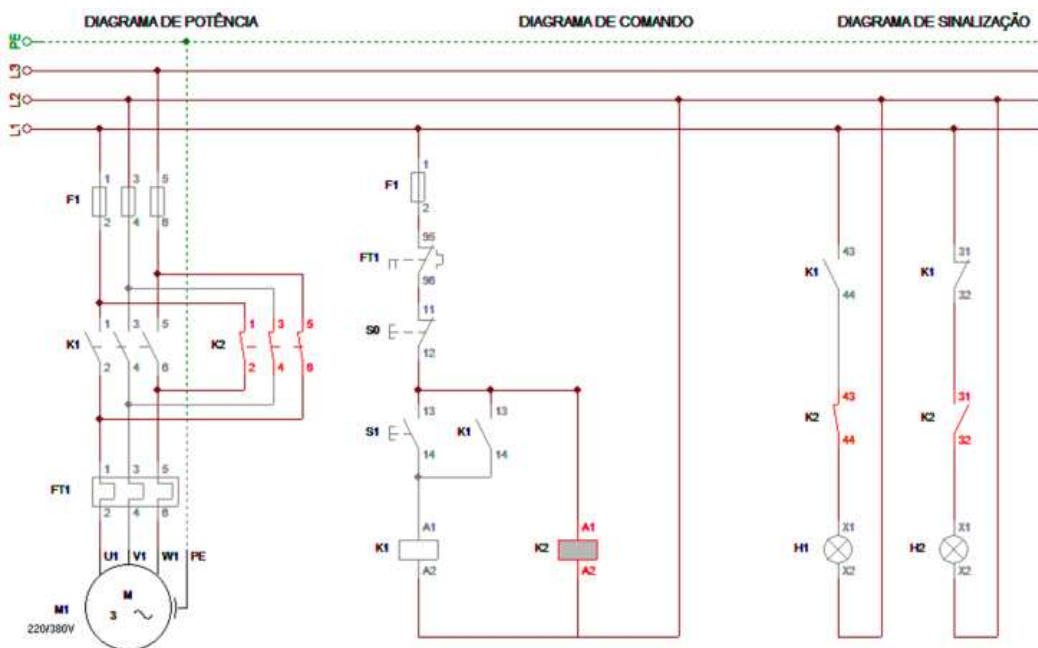


Figura 5.29 – Adição do contatoor K2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Contudo, se o contator K2 estiver sempre energizado, o motor permanecerá ligado constantemente nesse sentido. Por isso, adiciona-se um botão de pulso (S2 - NA), que ativa o motor no sentido anti-horário apenas enquanto pressionado, como ilustrado na figura 5.30.

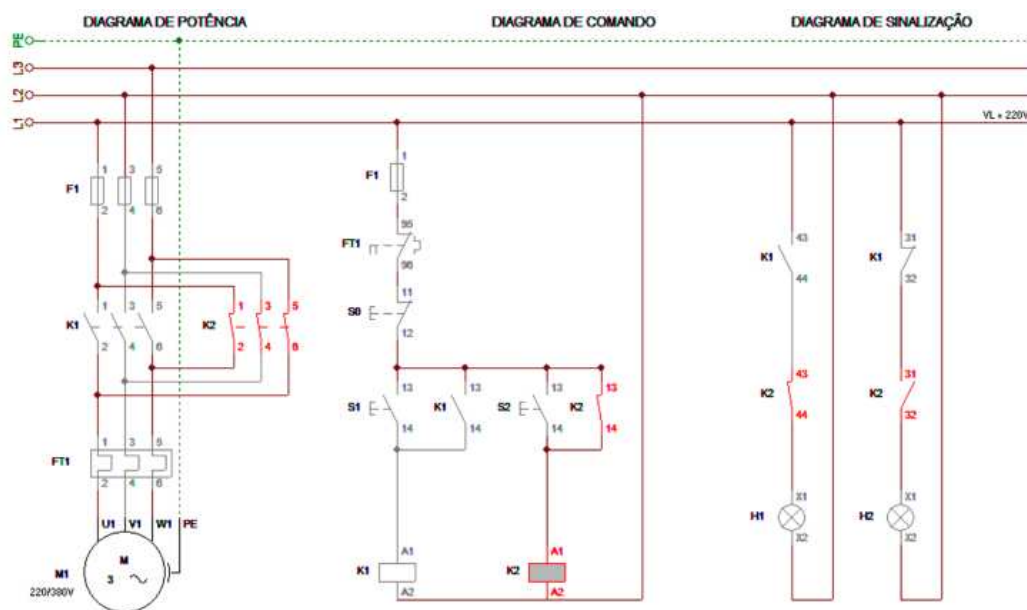


Figura 5.30 – Adição do botão para reversão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para manter o motor ligado sem a necessidade de pressionar continuamente o botão, é utilizado um contato de selo, que é um contato auxiliar do próprio contator. Ele mantém a bobina energizada até que o botão de desligamento (S0 - NF) seja pressionado.

Entretanto, há um risco no circuito: se ambos os contadores (K1 e K2) forem acionados simultaneamente, ocorrerá um curto-circuito. Para evitar essa situação, é necessário implementar um sistema de intertravamento elétrico.

O intertravamento elétrico é um mecanismo que impede a energização simultânea dos dois contadores. Para isso, são usados contatos auxiliares normalmente fechados (NF) de cada contator, garantindo que:

- Quando K1 está acionado, K2 não pode ser energizado.
- Quando K2 está acionado, K1 não pode ser energizado.

Isso significa que somente um dos contadores pode ser ligado por vez, garantindo um funcionamento seguro. A figura 5.31 apresenta essa configuração.

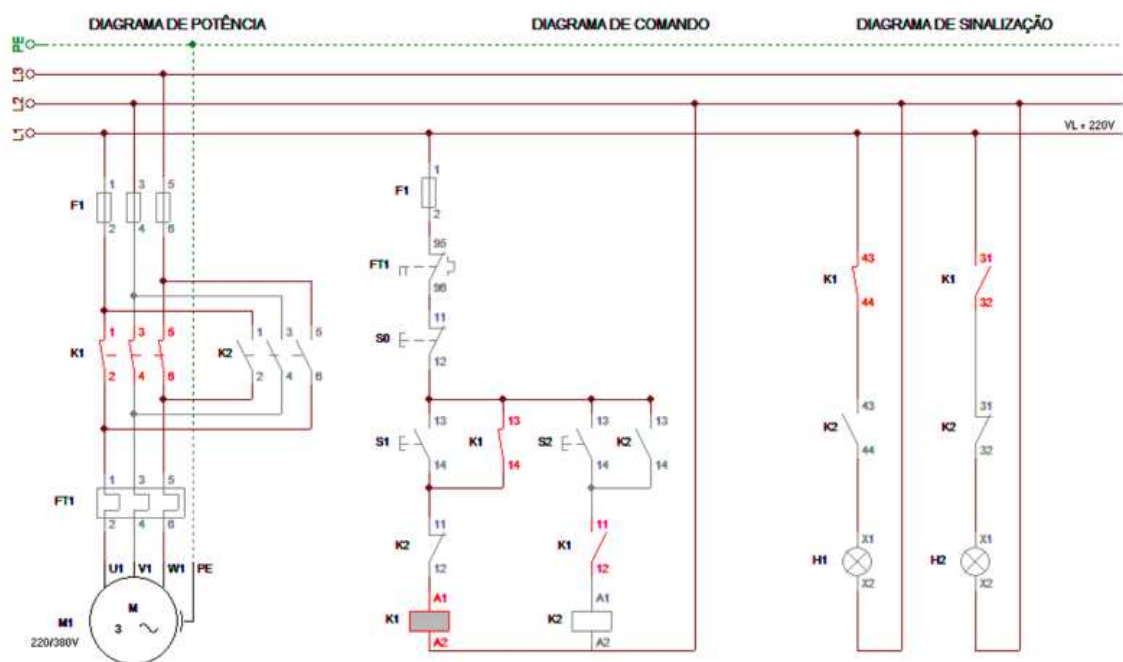
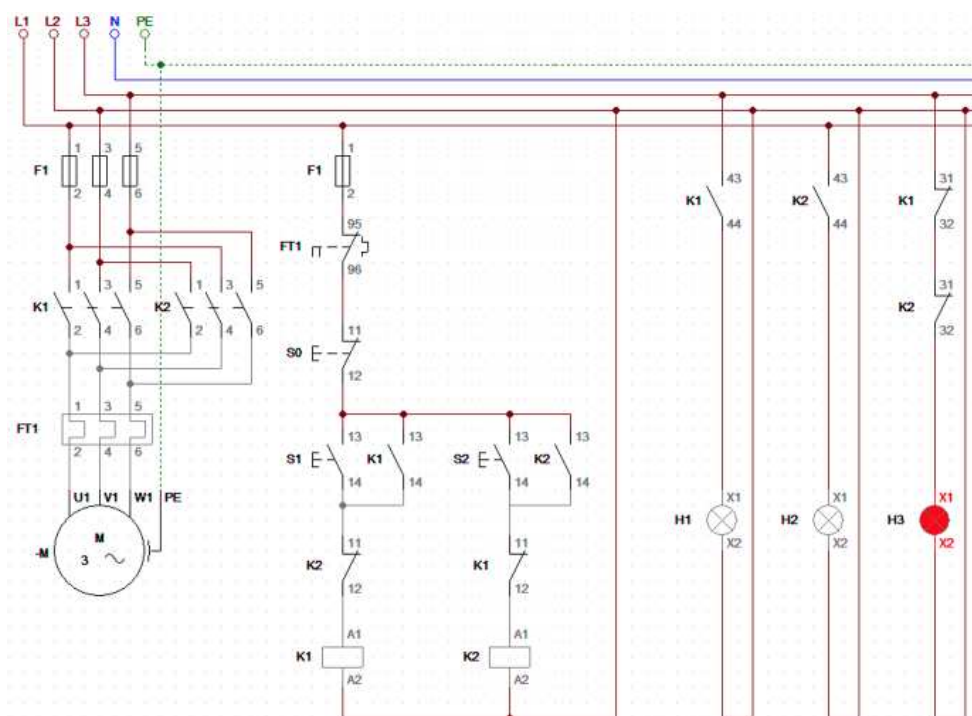


Figura 5.31 – Diagrama com selo com intertravamento.



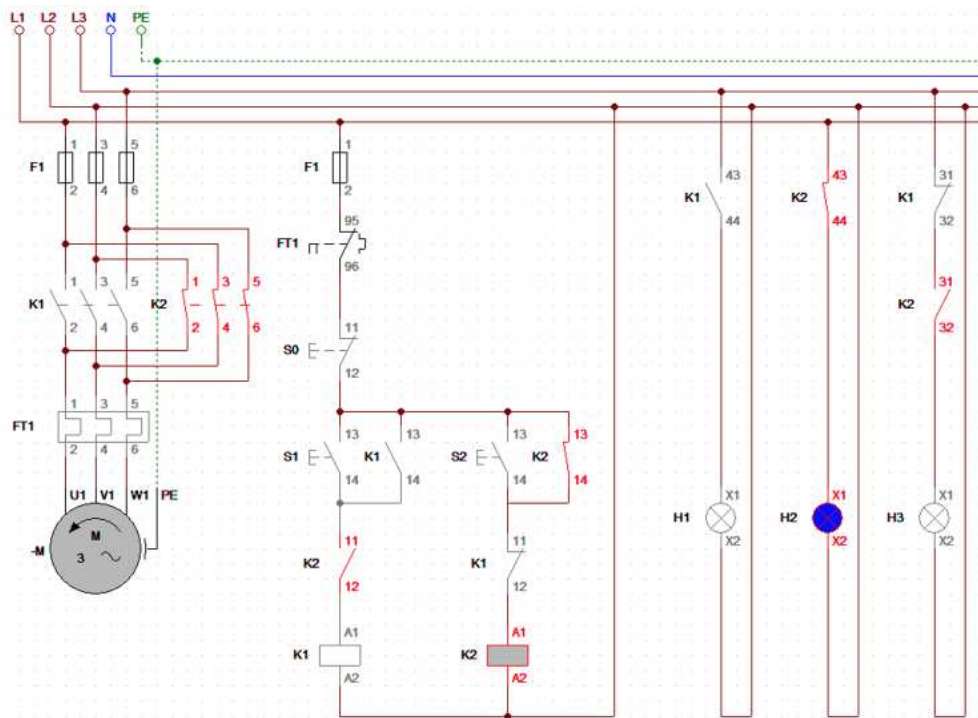


Figura 5.33 – Simulação com motor no sentido anti horário.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

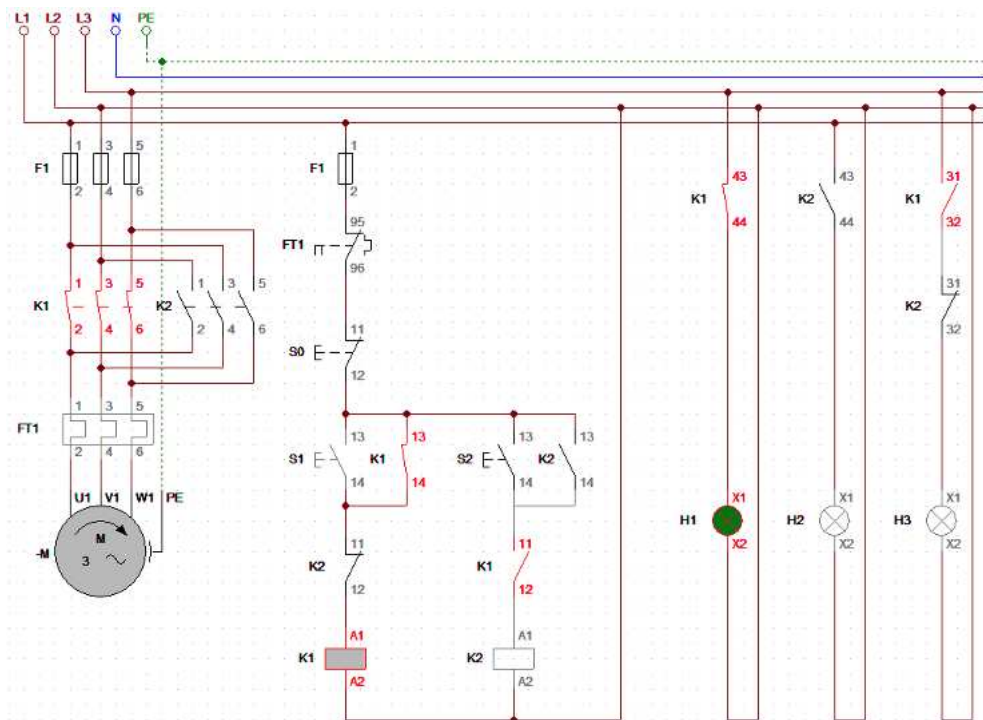


Figura 5.34 – Simulação com motor no sentido horário.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para tornar a operação mais intuitiva e segura, foram adicionadas luzes indicadoras que sinalizam o estado do sistema. A lâmpada vermelha (H3) indica que o sistema está desligado, sem nenhum contator ativado, enquanto a lâmpada verde (H1) sinaliza que o motor está girando no sentido horário (K1 ativado) e a lâmpada azul (H2) indica o funcionamento no sentido anti-horário (K2 ativado). Essas sinalizações permitem ao operador identificar rapidamente o estado operacional do motor, facilitando sua utilização e aumentando a segurança do sistema. As figuras 5.32, 5.33 e 5.34 ilustram o funcionamento dessas indicações.

A partida com reversão é um método simples e eficaz para mudar o sentido de rotação em motores trifásicos, fundamental em equipamentos industriais como pontes rolantes, esteiras transportadoras e guinchos. O uso adequado dos intertravamentos elétricos e mecânicos protege contra falhas e aumenta a segurança operacional.

5.9 CONCLUSÃO

O estudo das máquinas elétricas é essencial para compreender a conversão de energia elétrica em mecânica e vice-versa, sendo a base para diversas aplicações industriais e comerciais. Neste capítulo, foram explorados os princípios de funcionamento de motores e geradores, analisando suas características e desempenho por meio de experimentos práticos. Essas atividades permitiram verificar como fatores como tensão, corrente e carga influenciam diretamente no comportamento dessas máquinas, consolidando os conceitos teóricos apresentados.

Além do funcionamento dos motores e geradores, foi abordado o estudo dos sistemas de acionamento e controle, que desempenham um papel fundamental na segurança e eficiência dos processos industriais. A utilização de dispositivos de comando, como contadores, relés e inversores de frequência, possibilita o controle preciso do sentido de rotação, da velocidade e da proteção dos motores. Os experimentos realizados demonstraram, na prática, como essas soluções são aplicadas para otimizar o desempenho das máquinas elétricas, garantindo confiabilidade e facilidade na operação.

Por fim, este capítulo complementa os estudos sobre transformadores, abordados anteriormente, e estabelece a base para a compreensão integrada dos sistemas elétricos. Como os transformadores fornecem os níveis adequados de tensão e corrente para a operação das máquinas elétricas, seu funcionamento está diretamente relacionado à eficiência dos sistemas de acionamento e controle. Assim, o conhecimento adquirido aqui reforça a importância de uma abordagem combinada entre teoria e prática, preparando o leitor para desafios técnicos e aplicações reais no setor elétrico.

6 CONCLUSÃO

A formação de engenheiros eletricitas precisa equilibrar teoria e prática para garantir que os estudantes compreendam bem os conceitos básicos e consigam aplicá-los na vida profissional. Este trabalho teve como objetivo reforçar esse aprendizado por meio da criação de roteiros experimentais estruturados sobre conversão de energia elétrica, transformadores e máquinas elétricas. Os roteiros elaborados têm como propósito demonstrar claramente, de forma prática, os princípios teóricos estudados, destacando a importância das atividades laboratoriais no ensino da engenharia elétrica.

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram abordados temas essenciais para o entendimento dos sistemas elétricos. O estudo do sistema trifásico serviu como base para compreender a conversão de energia elétrica, enquanto os roteiros sobre transformadores esclareceram como esses dispositivos ajustam níveis de tensão para diversas aplicações práticas. O detalhamento das máquinas elétricas permitiu apresentar de maneira clara o funcionamento de motores e geradores, além de destacar os principais métodos de acionamento e controle utilizados para otimizar o desempenho desses equipamentos. Essa abordagem integrada oferece uma visão ampla e facilita a compreensão prática dos conceitos.

Com este material, espera-se contribuir para uma melhor integração das atividades práticas com o ensino teórico. A descrição clara dos fenômenos eletromagnéticos, como as Leis de Faraday e Lenz, e dos aspectos práticos envolvendo motores e transformadores em diferentes situações reforça a relação entre teoria e realidade. Além disso, o uso de equipamentos como bancadas didáticas e módulos específicos para testes elétricos foi proposto como estratégia para facilitar o aprendizado e preparar os estudantes para os desafios técnicos reais do setor elétrico.

Dessa forma, este estudo reforça a relevância das atividades experimentais no ensino de engenharia elétrica, destacando que uma formação prática sólida é essencial para preparar futuros profissionais qualificados e aptos para o mercado de trabalho. Espera-se que este material sirva como referência para aprimorar o ensino prático, incentivando o desenvolvimento de novos roteiros experimentais e metodologias didáticas alinhadas com as demandas atuais do setor.

REFERÊNCIAS

- 1 SOUZA, C. B. D. O. D.; FERNANDO, J.; LOBATO, P. **A relação teoria e prática no ensino superior**. 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/63034/Ensino2012_Resumo_25947.pdf>.
- 2 BUENO, G.; OLIVEIRA, G. R. G. d.; SANTANA, M. A. d. L.; JORGE, N. I. N.; ANJOS, K. C. P. d.; OLIVERIA, A. F. d. O ensino e aprendizagem por meio de aulas práticas no curso de engenharia de energia. v. 6, 11 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/17285/11685>>.
- 3 KOLB, D. A. **Experiential learning: Experience as the source of learning and development**. [S.l.]: Prentice Hall, 1984.
- 4 WANKAT, P. C.; OREOVICZ, F. S. **Teaching engineering**. [S.l.]: Purdue University Press, 2015.
- 5 FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **Journal of Engineering Education**, v. 94, n. 1, p. 121–130, 2005.
- 6 E, F. A.; KINGSLEY, C.; D, U. S. **Electric machinery**. 7. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2013.
- 7 H, H. W.; A, B. J. **Engineering electromagnetics**. 9. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2021.
- 8 GURU, B. S.; HIZIROGLU, H. R. **Electric machinery and transformers**. 3. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2001.
- 9 KRAUSE, P. C.; WASYNECZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of electric machinery and drive systems**. 3. ed. [S.l.]: IEEE Press, 2013.
- 10 ALEXANDER, C. K.; , M. . **Fundamentals of electric circuits**. 7. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2022.
- 11 CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2013.
- 12 HUGHES, E. **Electrical and electronic technology**. [S.l.]: Pearson.
- 13 C, S. P. **Principles of electric machines and power electronics**. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2013.
- 14 J, N. I.; P, K. D. **Electric machines**. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2017.
- 15 DORF, R. C.; SVOBODA, J. A. **Introduction to electric circuits**. 9. ed. [S.l.]: Wiley, 2016.
- 16 ALVES, A. L.; SOUZA, E. M. de; MACHADO, C. P.; LITTIKE, K. A.; SILVA, D. M. S. da. O transformador: teoria, construção e análise do rendimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2022.

- 17 PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas passo a passo**. [S.l.]: Sao Paulo Oficina De Textos, 2015.
- 18 CAUS, T. R.; MICHELS, A. **Hidrelétrica: Eficiência na Geração**. 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1380/Caus_Tuane_Regina.pdf?sequence=1>.
- 19 TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: Prentice-Hall do Brasil, 1994.
- 20 CARVALHO, G. **Máquinas elétricas**. 1. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2014.
- 21 SIMONE, G. A.; CREPPE, R. C. **Conversão eletromecânica de energia**. [S.l.]: Editora Érica, 2010.
- 22 FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2008.
- 23 NASCIMENTO, G. **Comandos elétricos: teoria e atividades**. 1. ed. [S.l.]: Editora Érica, 2011.