



Universidade Federal de Mato Grosso
Instituto de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

**Maleta Didática - Máquina de corrente contínua aplicada no
ensino de eletromagnetismo para o ensino médio**

Murilo Araujo Santos

Cuiabá - Mato Grosso
Julho de 2021

Murilo Araujo Santos

Maleta Didática - Máquina de corrente contínua aplicada no ensino de eletromagnetismo para o ensino médio

Produto didático apresentado ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Mato Grosso no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora: Dr^a Daniela de Oliveira Maionchi.

Cuiabá - Mato Grosso
Junho de 2021

Sumário

1	Produto Educacional	4
1.1	Apresentação	4
1.2	Maleta Didática	4
1.2.1	Passo a passo da construção	6
1.2.2	Dicas para montagem da maleta	6
1.3	Possíveis abordagens	7
1.3.1	Conceitos de circuitos elétricos: série e paralelo	7
1.3.2	Utilização do multímetro	7
1.3.3	Tensão elétrica e velocidade de rotação do motor	9
1.3.4	Carga mecânica no eixo do motor e corrente injetada	10
1.3.5	Funcionamento do motor em corrente alternada	11
1.3.6	Circuito retificador de meia onda	11
1.3.7	Correntes parasitas	12
1.3.8	Campo magnético residual	13
1.3.9	Função geradora	14
1.4	Sequência Didática	14
1.4.1	Aula 1	15
1.4.2	Aula 2	17
1.4.3	Aula 3	17
1.4.4	Aula 4	23
1.4.5	Aula 5	26

Capítulo 1

Produto Educacional

1.1 Apresentação

Prezado professor, este presente trabalho propõe a construção de uma maleta didática com uma máquina de corrente contínua que visa auxiliar o processo de ensino-aprendizagem dentro da área do eletromagnetismo clássico para o ensino médio.

Este trabalho foi embasado na teoria da aprendizagem significativa, proposta por David Ausubel. Almeja-se que os alunos consigam aprender de forma significativa e que sejam capazes de transferir esse conhecimento para situações análogas. Para isso, foi trazido questões do cotidiano a fim de aproveitar os conhecimentos prévios que foram desenvolvidos ao longo da vida, possibilitando um refinamento desses subsunçores. Assim, permitindo que o conhecimento científico seja edificado na estrutura cognitiva do aprendiz.

Este produto didático aborda os conceitos de tensão e corrente elétrica, circuitos elétricos, a lei de indução eletromagnética de Faraday e semicondutores.

Inicialmente será apresentado como foi confeccionado a maleta didática para que outros professores de física possam desenvolver o produto e aplicar em suas turmas. E então, as possíveis abordagens utilizando a máquina de corrente contínua. Logo após, será apresentado um manual de procedimentos e propostas de aulas para que as demonstrações ocorram de forma segura.

1.2 Maleta Didática

A maleta didática é constituída por uma caixa retangular e, em seu interior, estão fixadas duas placas de acrílico, a máquina de corrente contínua e um bocal para lâmpadas. Nestas placas, estão embutidos os bornes e a chave de dois estados, conforme mostrado na Figura 1.1. Esses bornes são utilizados para facilitar as conexões do circuito através de conectores “banana”.



Figura 1.1: Foto da maleta didática.

A fim de se obter uma estética mais agradável, as alimentações elétricas provenientes das fontes de corrente contínua e alternada podem ser feitas através de terminais localizados na lateral direita da maleta didática.

Este produto é desenvolvido em forma de maleta com o intuito de ser prático e móvel. Desta forma, é possível levar o produto para diversas salas de aula, sem grandes dificuldades, mesmo para escolas que não possuem um laboratório disponível para auxiliar os estudantes. Para que as demonstrações possam ocorrer, é necessária a utilização de fontes de tensão contínua e alternada, um multímetro para mensurar os parâmetros elétricos como tensão e corrente elétrica e uma furadeira para servir como máquina primária na operação geradora.

A fonte de tensão contínua utilizada é fabricada pela INSTRUTHERM, modelo FA-3003. Possui uma tensão máxima de 32V e corrente elétrica de 3A, podendo fornecer no máximo 100W de potência. Essa tensão pode ser controlada através de dois seletores (ajuste fino e grosso). Já a fonte de tensão alternada é desenvolvida pela JNG, modelo TDGC2 de 1kVA. Sua tensão pode ser selecionada através do dial que vai de 0V a 140V e corrente elétrica máxima de 8A. A máquina de corrente contínua é fabricada pela Keli Motors, modelo HC5440M127-BD-CCA. Sua tensão nominal é de 127V e corrente de 4,72A, podendo oferecer no máximo 600W. Para demonstração da ação geradora, são utilizadas duas lâmpadas incandescentes de 12V (5W e 40W). A chave de dois estados e o

diodo são utilizados para demonstração do funcionamento de um liquidificador doméstico de duas velocidades, muito comum em domicílios brasileiros.

1.2.1 Passo a passo da construção

A construção da maleta conforme sugerida pelo autor está descrita passo a passo abaixo:

- Elaborar um projeto com desenhos da maleta didática, a fim de observar as dimensões necessárias da caixa e das placas em acrílico, bem como as identificações dos bornes. Uma sugestão desses desenhos está apresentada no final deste guia. (Nesta sugestão, as placas possuem 7mm de espessura e podem ser cortadas à laser. Não é indicado o uso de furadeiras com brocas para realizar os furos, pois estas podem trincar a placa de acrílico, danificando permanentemente o material.);
- Remover a película protetora da placa e inserir os bornes e a chave de dois estados;
- Com auxílio de um alicate de corte, descontinuar os terminais dos enrolamentos de campo e armadura da máquina de corrente contínua;
- Soldar os terminais à condutores de $1,5\text{mm}^2$ e então protegê-los eletricamente com fita isolante;
- Clipar esses condutores com um terminal do tipo “olhal” e então conectar aos respectivos bornes;
- Fixar as placas e a máquina no interior da maleta utilizando chapas metálicas de 90° e parafusos com porcas, comumente encontradas em lojas de marcenaria;
- Realizar o mesmo procedimento para efetuar a ligação do bocal da lâmpada incandescente (40W), o diodo, a chave de dois estados e a lâmpada incandescente de 5W.

1.2.2 Dicas para montagem da maleta

Sugiro que tercerize a montagem da caixa. Leve o desenho 01/03 localizado no final deste trabalho a um marceneiro. Peça que coloque um pistão a gás para auxiliar a abertura e uma alça para transporte. As placas de acrílico devem ser cortadas à laser, portanto, sugiro que encontre uma empresa especializada para fazer isso. Uma sugestão de *layout* está apresentado no final deste guia. Está presente também, no final do guia, etiquetas que podem ser utilizadas para identificação dos bornes referentes ao enrolamento de campo, enrolamento de armadura, fonte de tensão contínua, fonte de tensão alternada, lâmpada, diodo e a chave de dois estados. Todos os desenhos estão em escala.

1.3 Possíveis abordagens

1.3.1 Conceitos de circuitos elétricos: série e paralelo

Geralmente, quando se trabalha com eletrodinâmica no ensino médio, os conceitos de série e paralelo são limitados à teoria. Sem a atividade prática, o aluno acaba não tendo uma oportunidade de relacionar esses conceitos com a prática.

A Figura 1.8 mostra os terminais do enrolamento de campo e enrolamento de armadura e a fonte de tensão contínua presentes no interior da maleta didática. Para realizar a ligação paralela entre os enrolamentos e a fonte de tensão contínua, deve-se ligar o borne 1-3-5 e 2-4-6.

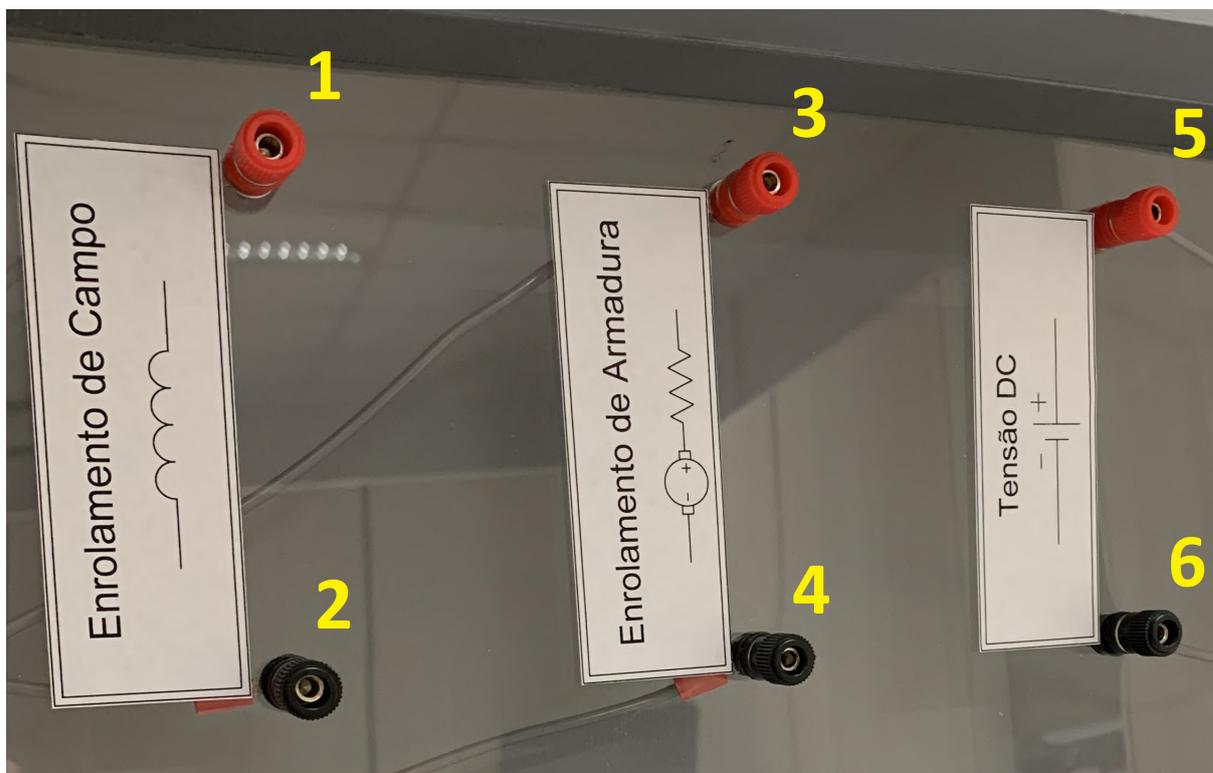


Figura 1.2: Bornes relativos ao enrolamento de campo, enrolamento de armadura e da fonte de corrente contínua.

Para energizar os enrolamentos do motor em série, ligam-se os terminais 5-3. A corrente flui por dentro do enrolamento da armadura e sai pelo borne 4 e então entra pelo borne 2, segue pelo enrolamento de campo e então sai pelo borne 1 até o outro terminal da fonte de corrente contínua. Essa ligação está demonstrada na Figura 1.3.

1.3.2 Utilização do multímetro

É importante o correto manuseio de instrumentos de medição para aferir parâmetros elétricos como tensão e corrente elétrica. O posicionamento incorreto das pontes pode resultar em uma leitura errada ou até mesmo em um incidente.

O voltímetro possui uma resistência interna equivalente muito elevada, na ordem de $10^7 \Omega$ (STOJILOVIC; ISAACS, 2018) e deve ser ligado em paralelo com o ramo o qual se pretende medir a tensão elétrica. Caso esse instrumento seja conectado em série, o observador lerá uma determinada tensão equivocada, além de impossibilitar seu apropriado funcionamento.



Figura 1.3: Conexão série dos enrolamentos da armadura e de campo do motor alimentados pela fonte de corrente contínua.

Já o amperímetro, que possui uma resistência elétrica interna equivalente muito baixa, deve ser conectado em série com o ramo para que uma correta mensuração da corrente elétrica seja realizada. Se esse instrumento for utilizado em paralelo com a fonte de tensão, ocorrerá um curto circuito, comprometendo a segurança do experimento e causando contratempos como a queima de fusíveis.

A utilização do alicate amperímetro também pode ser demonstrada com auxílio desta maleta didática. Este alicate não consegue medir correntes constantes no tempo, pois seu funcionamento depende de indução eletromagnética. O campo magnético emanado pelo condutor deve ser variante no tempo para que haja uma tensão induzida no circuito do multímetro e, posteriormente, traduzido em valores de corrente elétrica. O professor

poderá ligar a máquina em corrente contínua e alternada (discutido na subseção ??) para comparar as aferições realizadas.

Espera-se que o aluno possa, com auxílio do professor, aprender a manusear os equipamentos de medição e realizar aferições corretas de tensão e corrente elétrica. A lei de indução eletromagnética de Faraday também pode ser explorada tendo em vista a possibilidade de demonstração com o alicate amperímetro.

1.3.3 Tensão elétrica e velocidade de rotação do motor

Na excitação em série, a alteração da tensão de alimentação reflete diretamente na velocidade de rotação do motor. Seu circuito elétrico equivalente está representado na Figura 1.4.

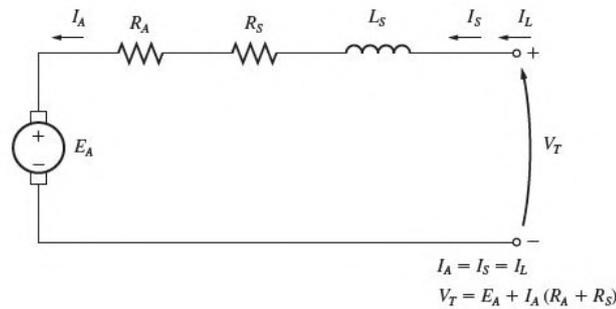


Figura 1.4: Circuito elétrico equivalente da máquina de corrente contínua na excitação em série - retirado de (CHAPMAN, 2013).

Onde R_S e L_S representam a resistência e indutância do enrolamento de campo. Já o R_A representa a resistência elétrica do enrolamento de armadura. Esse acréscimo de velocidade devido ao acréscimo de tensão terminal pode ser analisado por uma abordagem qualitativa (CHAPMAN, 2013). Assumindo que o motor não possui carga mecânica útil no eixo (o que é o caso no motor presente na maleta didática), o torque de carga, τ_{carga} , corresponde apenas ao efeito do atrito. Suponhamos que o motor já esteja rodando com velocidade angular constante ($\omega > 0$), então temos que $\tau_{carga} = \tau_{ind}$.

A elevação de V_T implica num aumento da corrente I_L , o que leva a um aumento de torque induzido conforme a seguinte equação,

$$\tau_{ind} = K \phi_B I_L. \quad (1.1)$$

Esse aumento de τ_{ind} desequilibra a situação $\tau_{carga} = \tau_{ind}$, gerando um torque τ não nulo que provoca uma aceleração angular α a favor do movimento rotacional segundo

$$\tau = I_m \alpha. \quad (1.2)$$

Onde I_m é o momento de inércia dado em $kg.m^2$ e α é a aceleração angular dada em $rad.s^{-2}$. Esta aceleração resulta em um aumento da velocidade de rotação do eixo do motor e, conseqüentemente, aumento da tensão induzida no enrolamento da armadura.

Este fenômeno acontece devido à variação de fluxo magnético que atravessa as espiras do enrolamento do rotor. Essa tensão interna gerada é descrita no circuito elétrico por E_A como

$$E_A = K \phi_B \omega_m, \quad (1.3)$$

onde K é uma constante que depende das características construtivas do motor, ϕ_B é o fluxo magnético dado em *weber* e ω_m é a frequência de rotação dada em rotações por minuto.

O aumento da tensão E_a ajuda a reduzir a corrente I_L . Esta diminuição de corrente I_L reduz o τ_{ind} até que $\tau_{ind} = \tau_{carga}$ estabilizando a rotação ω_m a uma velocidade mais alta.

Essa dinâmica pode ser apresentada aos alunos com auxílio da maleta didática. Através do monitoramento dos parâmetros de tensão e corrente, é possível constatar essas alterações. Com isso, o subsunçor da eletrodinâmica pode ser estimulado, pois aborda-se o assunto de uma forma não convencional, inserido em um contexto prático.

1.3.4 Carga mecânica no eixo do motor e corrente injetada

O motor de corrente contínua apresenta uma reação quando carga mecânica é adicionada ao seu eixo. Essa reação é observada na corrente que o motor solicita.

Para exemplificar esse fenômeno, será utilizado o motor de corrente contínua com o enrolamento de campo e de armadura ligados em série (excitação em série) conforme mostrado na subseção anterior (Figura 1.4). A corrente é definida por (CHAPMAN, 2013),

$$I_L = \frac{V_T - E_A}{R_A + R_S}. \quad (1.4)$$

Substituindo a Equação (1.3) em (1.4), temos,

$$I_L = \frac{V_T - K \phi_B \omega_m}{R_A + R_S}. \quad (1.5)$$

Desta forma, pode-se observar que a rotação do motor tem influência na corrente que ele solicita. Quando ω_m diminui, a corrente aumenta e vice-versa. Por exemplo, um motor de 50HP a 250V demanda uma corrente 20 vezes a corrente nominal no momento de sua partida ($\omega_m = 0$) (CHAPMAN, 2013). Esta corrente de partida também é denominada por corrente de rotor bloqueado. Os enrolamentos não são dimensionados para suportar esta corrente por um tempo relativamente grande. No momento de sua partida, essa corrente elevada circula por um breve período de tempo, variando de acordo com a potência nominal do motor e a inércia da carga mecânica acoplada ao seu eixo, mantendo assim a temperatura dos condutores em um nível seguro.

No contexto do liquidificador, essa corrente pode ser superior à corrente nominal em algumas situações. Isso acontece quando são adicionadas cargas mecânicas difíceis de

serem processadas. A corrente elevada causa uma maior dissipação de energia nos condutores, aumentando sua temperatura. Se essa situação é mantida por um tempo razoável, o verniz que envolve os condutores pode carbonizar e liberar um odor de queimado característico. Além disso, o aumento de temperatura pode levar ao derretimento parcial das bobinas do motor resultando potencialmente em uma interrupção do circuito elétrico. Caso isso ocorra, o motor apresentará características de desempenho prejudicadas, ou até mesmo não funcionar.

Na perspectiva do processo de ensino-aprendizagem, esse fenômeno pode auxiliar a aprendizagem do aluno, tendo em vista que existe um certo conhecimento popular sobre a possibilidade do liquidificador queimar quando este opera com sobrecarga mecânica.

É possível demonstrar esse aumento de corrente utilizando a maleta didática. Primeiramente deve-se ligar o motor em uma tensão reduzida (neste caso, é sugerido utilizar 15V), o que implica em um torque induzido também baixo. Desta forma, é possível segurar o eixo do motor com as próprias mãos, simulando um aumento de carga mecânica, sem comprometer a segurança da demonstração. Ainda, com o auxílio de um amperímetro, pode-se visualizar esse aumento na corrente injetada no motor de corrente contínua.

1.3.5 Funcionamento do motor em corrente alternada

Para alterar o sentido de rotação do rotor, é necessária a inversão da corrente no enrolamento da armadura **ou** no enrolamento de campo do motor. Caso o sentido dos dois enrolamentos sejam alterados simultaneamente, o rotor permanecerá com o sentido de rotação inalterado.

Quando o motor é ligado em série, a corrente será a mesma nos dois enrolamentos. Na corrente alternada, a inversão do sentido da corrente acontece para os dois enrolamentos simultaneamente. Desta forma, o sentido do torque permanece inalterado. Seu funcionamento pode ser demonstrado utilizando a maleta didática e a sua velocidade de rotação pode ser controlada através do nível de tensão que se estabelece em seus terminais.

Este motor, quando ligado em série, também é chamado de **motor universal**, pois funciona adequadamente em corrente contínua ou corrente alternada.

1.3.6 Circuito retificador de meia onda

Sabe-se que a redução da tensão eficaz do motor de corrente contínua reduz sua velocidade de rotação. Os liquidificadores domésticos mais comuns possuem duas velocidades de rotação, representados pelas posições 1 e 2. Vale salientar que este motor é conectado à tensão nominal de 127V ou 220V (AC) dependendo da região no Brasil.

A Figura 1.5 representa o esquema elétrico utilizado em liquidificadores domésticos. Têm-se, da esquerda para direita, a fonte de tensão alternada, chave de dois estados, o diodo e o motor.

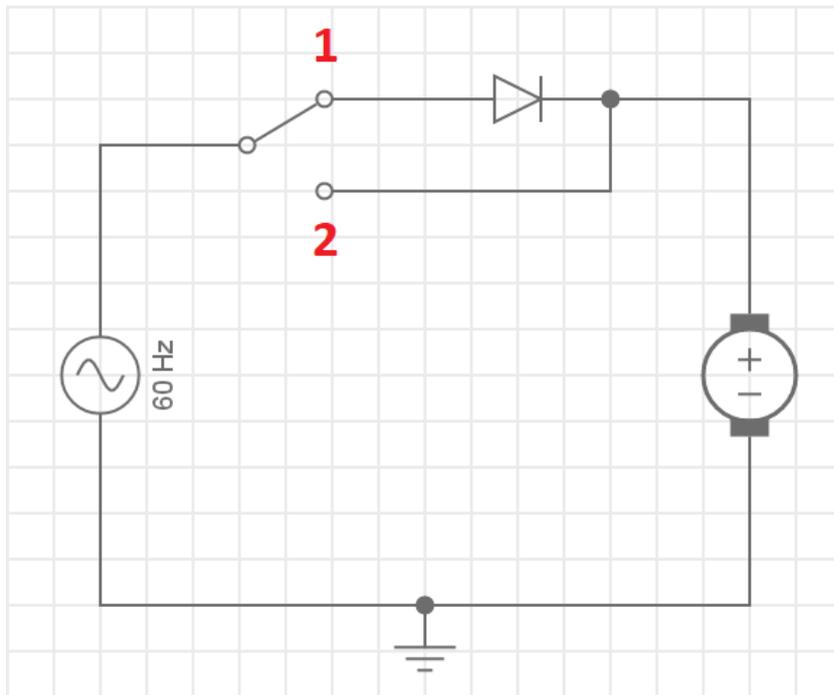


Figura 1.5: Circuito elétrico equivalente de um liquidificador doméstico com duas velocidades de rotação.

Quando a chave é colocada na posição 1, o motor é alimentado através de um diodo conforme mostrado na Figura 1.5.

O diodo é um dispositivo eletrônico geralmente composto por silício dopado com boro e fósforo que, resumidamente, permite a passagem de corrente apenas em um sentido (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2012). Quando é inversamente polarizado, este apresenta resistência elétrica equivalente muito elevada. Desta forma, o motor fica submetido a uma tensão eficaz inferior em comparação à ligação direta, sem diodo. Este circuito que utiliza o diodo para reduzir a tensão eficaz na carga também é denominado circuito retificador de meia onda.

Na posição 2, o motor é ligado em tensão nominal, o que acarreta uma maior velocidade de rotação e maior potência mecânica desenvolvida.

1.3.7 Correntes parasitas

Como visto na subseção 1.3.5, este motor também pode trabalhar com corrente alternada. Na excitação em série, a corrente que flui no motor é a mesma tanto no enrolamento de campo, quanto no enrolamento de armadura. Esta corrente oscilará de acordo com a frequência da fonte de tensão. No Brasil, esta frequência é $60Hz$.

A corrente alternada que flui no enrolamento de campo induzirá um campo magnético também alternado no circuito magnético do motor. Sabe-se que um campo magnético que varia no tempo gera um campo elétrico que varia no espaço conforme a seguinte equação de Maxwell,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}. \quad (1.6)$$

O estator dessa máquina é composto por ligas metálicas, nas quais os elétrons da camada de valência acabam por se desvincular do núcleo, ficando livres. Quando este campo elétrico age sobre esses elétrons livres, há a aparição da seguinte força elétrica,

$$\vec{F} = Q \vec{E}. \quad (1.7)$$

Os elétrons então começam a circular de forma ordenada no núcleo magnético (rotor e estator) do motor, provocando aquecimento. Este processo é irreversível, diminuindo o rendimento e limitando a potência mecânica desenvolvida pela máquina.

No ensino médio, essas correntes induzidas podem ser explicadas através da lei de indução eletromagnética de Faraday,

$$Fem = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1.8)$$

onde Fem é a força eletromotriz dada em Volts, e $\frac{d\Phi}{dt}$ é a variação de fluxo magnético no tempo. Esse potencial elétrico presente nas chapas metálicas do motor geram corrente conforme a primeira lei de Ohm.

A laminação do núcleo magnético de máquinas elétricas, como motores e transformadores, diminui a intensidade da corrente parasita, acarretando menos perdas e elevando seu rendimento (AGARWAL, 1959). Essas correntes também são chamadas de correntes de Foucault. Desta forma, a corrente circulante fica suprimida, pois como há menos espaço para sua circulação, a mesma observa uma resistência elétrica equivalente maior, diminuindo a intensidade da corrente elétrica e conseqüentemente sua potência dissipada.

É possível observar este efeito utilizando a maleta didática. Ligando o motor no mesmo nível de tensão em corrente contínua e em corrente alternada verifica-se uma maior temperatura, em regime permanente, quando este é ligado em tensão alternada.

1.3.8 Campo magnético residual

Os átomos de materiais ferromagnéticos apresentam uma característica reativa quando expostos a campos magnéticos externos. Os elétrons desemparelhados sofrem torque e tendem a se alinhar com o campo magnético. Isso pode ser observado no funcionamento de bússolas. A agulha móvel precisa necessariamente estar imantada, ou seja, possuir um campo magnético interno para interagir com o campo magnético terrestre e indicar a direção magnética.

Em um outro exemplo, pode-se observar essa situação quando se coloca um ímã na caixa de ferramentas, próximo a chave de fenda. A chave de fenda se torna imantada e pode assim auxiliar a execução de trabalhos com parafusos.

Essa magnetização perdura por um certo tempo mesmo que a fonte de campo magnético seja removida. Essa magnetização diminui com o aumento da temperatura do material e eventuais choques mecânicos nele aplicado. Essa característica se deve ao chamado campo magnético residual ($\vec{B}_{residual}$). Esse fenômeno pode ser observado com a

utilização da maleta didática com a máquina funcionando no modo motor ou gerador.

Na função motor, deve-se ligar o enrolamento de campo com uma tensão contínua por alguns segundos. A corrente que fluirá pelo enrolamento será contínua, assim como seu campo magnético. Esse campo fará com que os momentos magnéticos dos átomos presentes no núcleo magnético da máquina também sejam alinhados. Cessa-se a alimentação elétrica do enrolamento de campo, levando sua corrente elétrica a zero. Entretanto, devido à questão inercial, o material ferromagnético que compõe o núcleo continua magnetizado com o $\vec{B}_{residual}$. Quando o enrolamento de armadura é alimentado com tensão contínua, é possível observar uma aceleração angular de seu eixo, implicando que o campo magnético no interior do motor seja necessariamente diferente de zero.

Na função geradora, em vez de alimentar o enrolamento de armadura, devemos conectar um voltímetro em seus terminais na menor escala. Ao rotacionar manualmente o eixo da máquina, pode-se observar uma pequena tensão induzida.

1.3.9 Função geradora

A máquina de corrente contínua pode ser utilizada como motor ou gerador. Vale salientar que não é necessária nenhuma alteração construtiva da máquina para isso. Basta observar o fluxo de potência, isto é, quando fornecemos alimentação elétrica a máquina nos fornece potência mecânica (motor). Quando fornecemos potência mecânica no eixo, podemos extrair uma tensão nos enrolamentos da armadura.

Pode ser demonstrado, através do uso da maleta didática, a função geradora da máquina de corrente contínua. Energiza-se o enrolamento de campo, gerando corrente elétrica e, conseqüentemente, campo magnético que permeará o rotor da máquina. Utilizando uma furadeira como máquina primária, podemos acoplá-la mecanicamente ao eixo da máquina através do mandril. Ao acionarmos a furadeira, o enrolamento de armadura também rotaciona dentro do campo magnético. Isso faz com que a variação de fluxo magnético no tempo seja diferente de zero, gerando uma tensão nos enrolamentos da armadura. Para uma visualização melhor por parte dos alunos, esse enrolamento de armadura é conectado a uma lâmpada incandescente de pequeno porte. É possível observar a relação direta entre a velocidade de rotação e a intensidade luminosa emitida pela lâmpada.

1.4 Sequência Didática

Será apresentado nessa seção algumas sugestões para abordagens no ensino do eletromagnetismo para o nível médio utilizando a máquina de corrente contínua. A duração das aulas depende do professor e da turma. Turmas que possuem mais dificuldades, provavelmente demandarão mais tempo para ter uma assimilação melhor. Nessas turmas, podem haver mais dúvidas e o professor despenderá mais tempo para saná-las. Caso seja uma turma com desempenho acadêmico superior, pode ser que essas atividades fluam melhor.

Portanto, as aulas apresentadas a seguir terão um tempo de aplicação sugerido de 60 a 90 minutos.

Para a realização das demonstrações práticas, alguns equipamentos e dispositivos serão necessários, são eles:

1. Máquina de corrente contínua (127V ou 220V com 600W);
2. Fonte de tensão contínua (Tensão variável de 0 a 30V)
3. Fonte de tensão alternada (Tensão variável de 0 a 100V);
4. Chave de dois estados;
5. Diodo (Tensão 220V e 2A);
6. Multímetro;
7. Alicates amperímetro;
8. Lâmpada incandescente de 12V (5W);
9. Furadeira.

Atenção! Nunca ligar o motor de corrente contínua em sua tensão nominal (127V ou 220V) sem carga mecânica. Esta máquina pode chegar a velocidades de rotações altíssimas e pode eventualmente danificar o enrolamento da armadura devido à força centrífuga. Para efeito de demonstração, tensões de no máximo 30V são suficientes. Desta forma, as demonstrações podem ocorrer de maneira segura.

1.4.1 Aula 1

Força elétrica e força magnética

Nesta aula é importante que o professor diferencie essas duas forças. Interessante salientar sobre a direção e sentido da força e do campo elétrico. Caso seja uma carga negativa, o que altera? Comentar sobre o sentido da força. Instigá-los a pensar sobre o surgimento desse campo elétrico e se possível, inserir o contexto real, mencionando um capacitor carregado. Executar um exercício onde uma carga seja arremessada dentro de um campo elétrico e debater sobre sua trajetória e sua variação de energia cinética.

No caso do campo magnético, o professor deve enfatizar a questão da direção da força magnética, que se difere da força elétrica. Neste caso, a força não fica na mesma direção do campo. Aliás, esta força é estabelecida de forma perpendicular ao plano que contém o vetor velocidade \vec{v} da carga e o vetor campo magnético \vec{B} . Para isso, seria interessante comentar brevemente sobre o produto vetorial e ensiná-los sobre a regra da mão direita ou a regra do “tapa”. O fato do vetor força \vec{F} , e conseqüentemente aceleração \vec{a} , aparecer sempre perpendicular ao movimento da carga implica em um fato importante: o módulo

do vetor velocidade \vec{v} permanece sempre constante. O vetor aceleração apenas descreve a mudança de direção do vetor velocidade da carga. Desta forma, não há variação de energia cinética na carga. Outra informação importante é sobre a inexistência de força magnética quando a carga se movimenta na mesma direção do campo magnético, seja no mesmo sentido ou sentido oposto. Se houver tempo, mostrar o vídeo conforme mostrado na figura 1.6 que trata sobre a ação do campo magnético sobre um tubo de raios catódicos.



Figura 1.6: Captura de tela do vídeo *Magnetic Forces and Magnetic Fields* - retirado de <https://youtu.be/RqSode4HZrE>.

Caso queira utilizar algum sistema de enquetes online, seja pelo *Telegram* ou outro *website*, segue alguns exemplos de perguntas:

- A energia cinética de uma carga elétrica varia quando estiver dentro de um campo elétrico. Certo ou Errado?
- A direção da força elétrica fica na mesma direção que o campo elétrico em uma carga dentro deste campo. Certo ou Errado?
- Quanto mais rápido uma carga atravessar um campo magnético, maior será a força magnética nela incidente. Certo ou Errado?
- Quanto mais intenso for o campo magnético, maior será a força incidente na carga. Certo ou Errado?
- Uma carga que atravessa um campo magnético necessariamente perceberá força. Certo ou Errado?
- A energia cinética de uma carga que corre dentro de um campo magnético sempre varia. Certo ou Errado?

1.4.2 Aula 2

Princípio de funcionamento do motor de corrente contínua e aspectos construtivos

Nesta aula, é interessante que o docente explique o princípio de funcionamento do motor e seus aspectos construtivos com auxílio de um vídeo. O recomendado é utilizar o vídeo apresentado na figura 1.7.

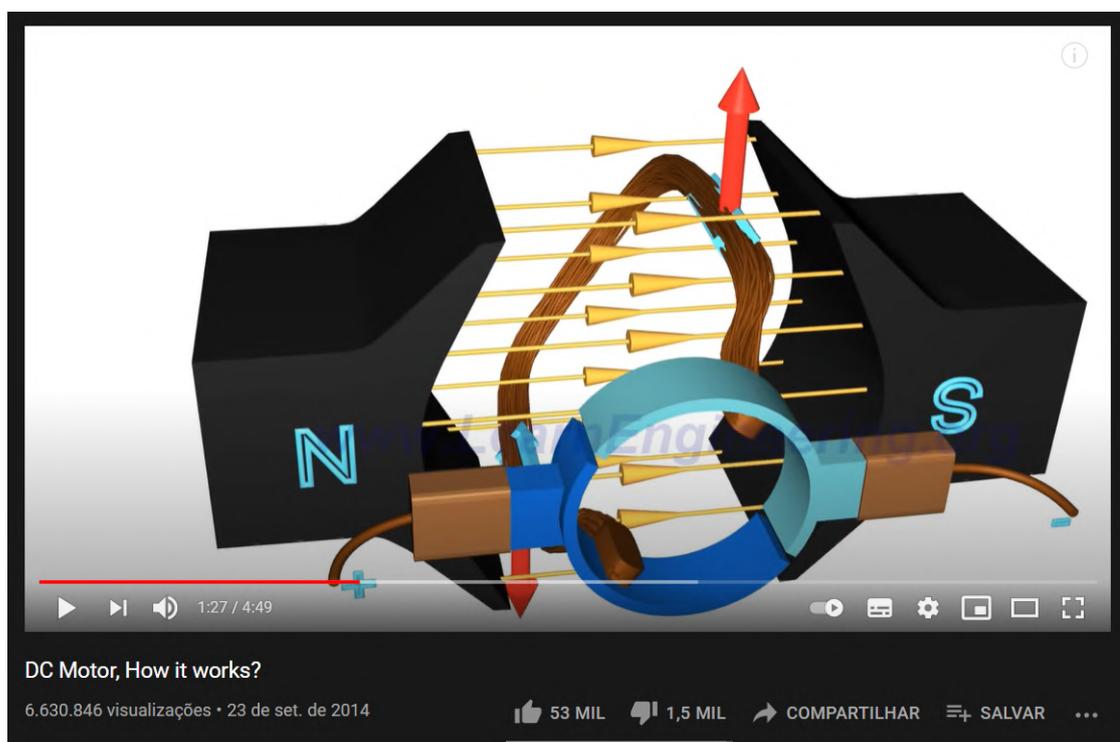


Figura 1.7: Captura de tela do vídeo *DC Motor, How it works?* - Disponível em: <https://youtu.be/LAtPHANefQo>.

Não esqueça de falar sobre o enrolamento de armadura, presente no rotor do motor, e o enrolamento de campo, presente no estator da máquina. Alguns motores funcionam com ímã permanente, não necessitando do enrolamento de campo.

Muito importante salientar a importância do anel comutador para esse tipo de máquina. Sem ele, não seria possível o funcionamento contínuo. Enfatizar também a necessidade das escovas e suas desvantagens como as manutenções que devem ser realizadas com frequência devido ao desgaste provocado pelo atrito dessas com o anel comutador.

1.4.3 Aula 3

Circuitos série e paralelo

Com os enrolamentos disponíveis para a ligação, é possível realizar a ligação série e paralelo do motor.

A Figura 1.8 mostra os terminais do enrolamento de campo e enrolamento de armadura e a fonte de tensão contínua presentes no interior da maleta didática. Para realizar a

ligação paralela entres os enrolamentos e a fonte de tensão contínua, deve-se ligar o borne 1-3-5 e 2-4-6 conforme mostrado na figura 1.9.

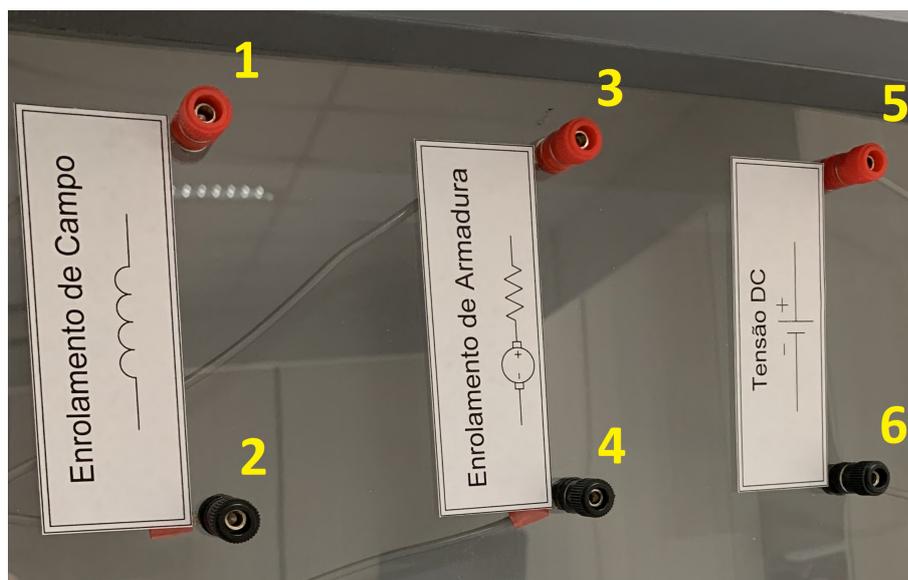


Figura 1.8: Bornes relativos ao enrolamento de campo, enrolamento de armadura e da fonte de corrente contínua.



Figura 1.9: Conexão paralela dos enrolamentos da armadura e de campo do motor alimentados pela fonte de corrente contínua.

Para energizar os enrolamentos do motor em série, ligam-se os terminais 5-3. A corrente flui por dentro do enrolamento da armadura e sai pelo borne 4 e então entra pelo borne 2, segue pelo enrolamento de campo e então sai pelo borne 1 até o outro terminal da fonte de corrente contínua. Essa ligação está demonstrada na Figura 1.10.



Figura 1.10: Conexão série dos enrolamentos da armadura e de campo do motor alimentados pela fonte de corrente contínua.

Aqui é possível, com auxílio da lousa, desenhar o circuito elétrico equivalente dos enrolamentos e a fonte de tensão. No caso, da ligação série, é possível debater acerca da lei de Kirchhoff das malhas. Pois a tensão da fonte será dividida entre os enrolamentos. Na ligação paralelo, é possível debater sobre a lei de Kirchhoff dos nós. O procedimento para medir esses parâmetros elétricos serão discutidos no próximo tópico.

Medições com multímetro

Para realizar as medições, é necessário se atentar à ligação do instrumento ao circuito elétrico. Para medir a tensão elétrica, o multímetro deve estar com sua chave selecionada na tensão em escala apropriada. E então, os terminais do multímetro devem ser colocados em paralelo com o ramo que se pretende medir conforme mostrado na figura 1.11.

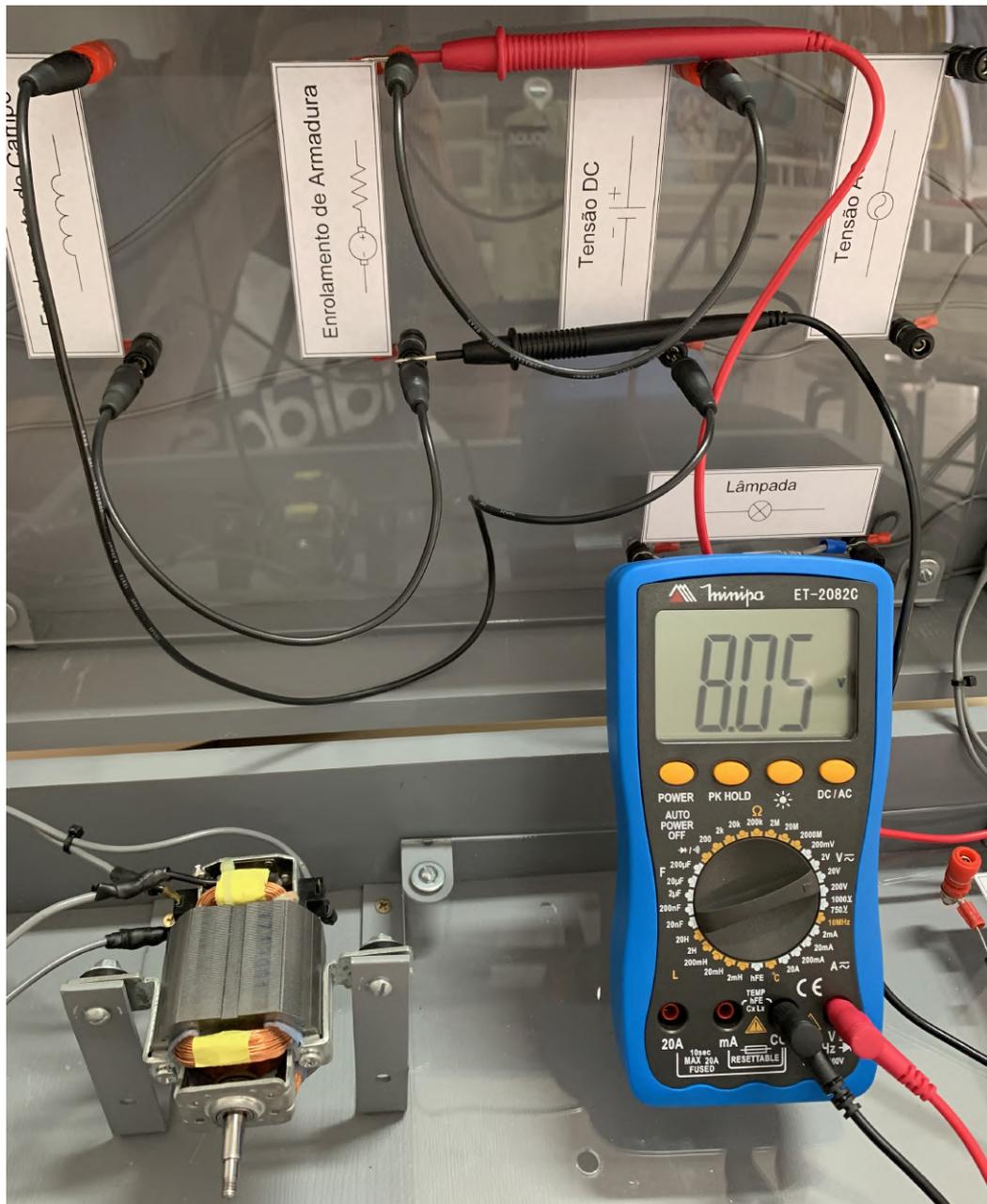


Figura 1.11: Medição da tensão interna gerada do enrolamento da armadura.

Caso seja colocado em série com o ramo, o motor pode não funcionar corretamente tendo em vista que não haverá corrente circulante por esse ramo, pois o voltímetro possui uma alta resistência equivalente.

Para medir a corrente, o multímetro deve estar com sua chave selecionada em corrente elétrica e sua escala deve ser observada. A fim de se ter uma correta leitura da corrente elétrica naquele determinado ramo, o amperímetro deve ser colocado em série. Uma maneira interessante é remover o cabo banana e substituí-lo pelos terminais do amperímetro, desta forma a corrente será forçada a passar integralmente por dentro do equipamento de medição conforme mostrado na figura 1.12.

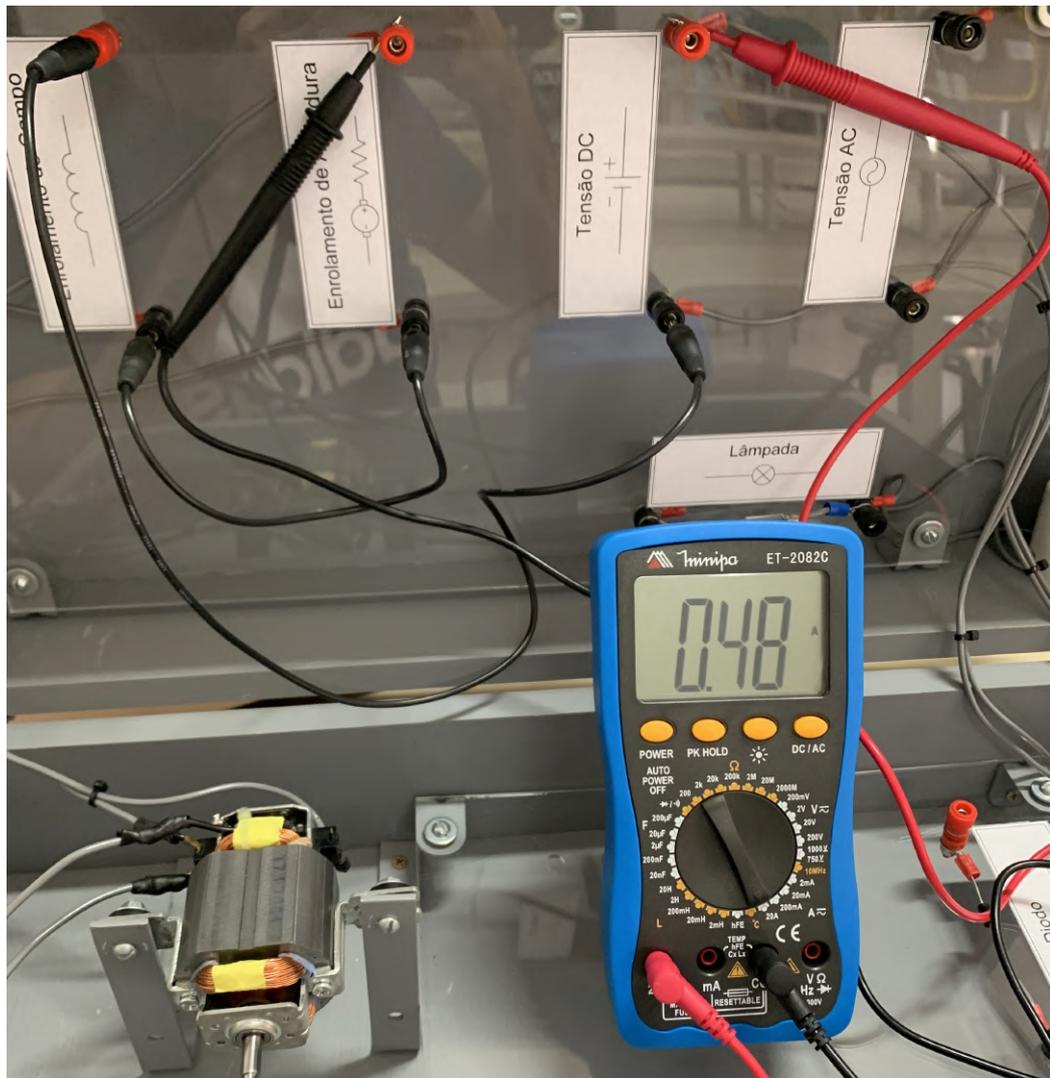


Figura 1.12: Medição da corrente elétrica do circuito.

Importante salientar que o instrumento de medição precisa estar ajustado para ler corrente contínua ou corrente alternada.

Para utilizar corretamente o alicate amperímetro, a primeira condição a ser satisfeita é a existência de corrente alternada no circuito. Como este equipamento tem seu princípio de funcionamento pautado na lei de indução eletromagnética de Faraday, é condição *sine qua non* que a corrente seja variante no tempo para haver medição. Para realizar a leitura, o alicate amperímetro deve envolver o condutor do ramo em questão conforme mostrado na figura 1.13.

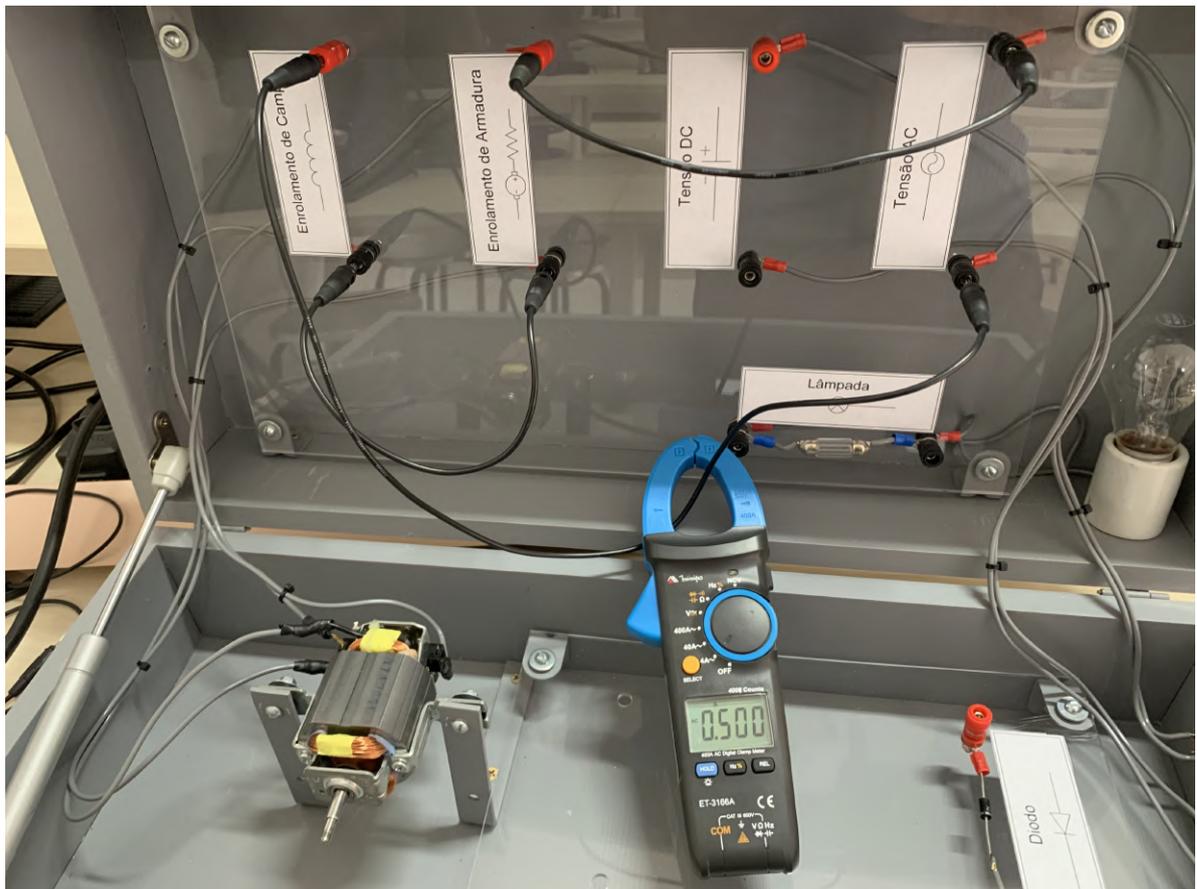


Figura 1.13: Medição da corrente elétrica pelo alicate amperímetro.

Importante também salientar que se o alicate envolver dois condutores que possuem a mesma corrente em sentidos opostos, o fluxo magnético resultante no interior do alicate será nulo e não haverá indução. Portanto, a corrente mensurada será igual a zero conforme mostrado na figura 1.14.



Figura 1.14: Medição da corrente elétrica pelo alicate amperímetro.

Tensão e velocidade de rotação

Ligue o motor de corrente contínua na excitação série. Conecte este à fonte de tensão contínua primeiramente com sua tensão zerada. Vá aumentando a tensão gradualmente. Com pouca tensão, a potência elétrica fornecida será baixa. Podendo não ser suficiente para gerar um torque induzido superior ao torque de carga (atrito). Desta forma, o motor continuará parado. Ressaltar aos alunos que, neste momento, o torque de carga não será maior que o torque induzido, será igual. Caso o torque de carga fosse maior, o motor aceleraria no sentido contrário violando o princípio de conservação da energia.

A partir de uma determinada tensão, o torque induzido começa a ser maior que o torque de carga e o motor acelera. Discuta sobre os parâmetros elétricos e mecânicos envolvidos nessa aceleração e desaceleração conforme a seção 1.3.3.

1.4.4 Aula 4

Carga mecânica e corrente injetada

Coloque o motor de corrente contínua na configuração série e alimente-o com a fonte de tensão contínua. Comece em 0V e vá aumentando até chegar na tensão suficiente para fazer o motor rodar, a menor possível. Dessa forma, o torque, a velocidade de rotação e,

consequentemente, a potência mecânica será reduzida. Desta forma, a demonstração será mais segura. Caso a fonte de tensão contínua tenha um amperímetro embutido, não será necessária a instalação de outro amperímetro.

Com as mãos, segure o eixo do motor. Aperte-o com os dedos, simulando um torque de carga. Caso prefira não utilizar a mão, é possível pressionar com um alicate. Se o torque de carga for maior que o torque induzido, haverá uma desaceleração do eixo do motor. Neste momento, é possível observar, através do amperímetro, uma maior corrente injetada pela fonte. Devido a menor tensão interna gerada nos enrolamentos da armadura. Inclusive, é possível medir essa queda na tensão conforme mostrado na figura 1.15.

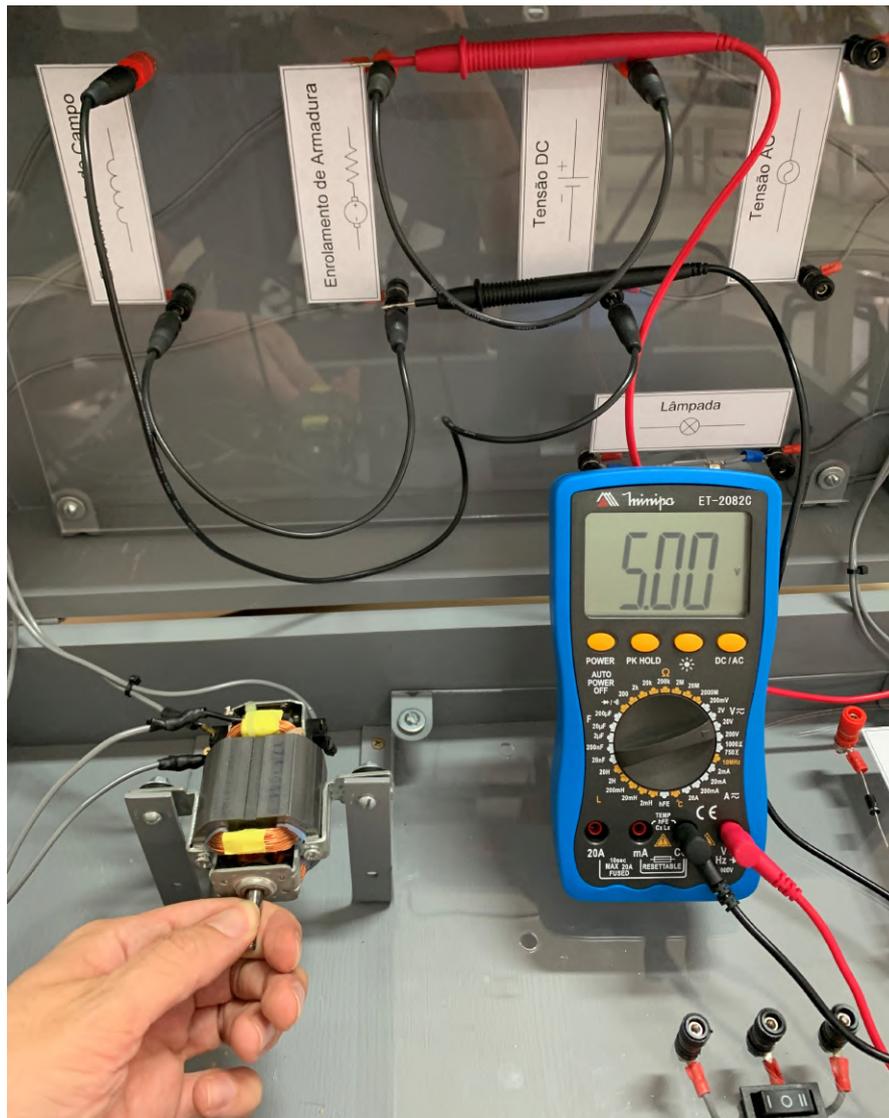


Figura 1.15: Redução na tensão interna gerada ao simular a inserção de torque de carga. A tensão com o eixo livre era de 8.05V conforme mostrado na figura 1.11.

Explique aos alunos que isso acontece também quando um liquidificador funciona com uma carga mecânica elevada. Porém, no caso do liquidificador, deve-se ressaltar que este se encontra em tensão nominal (127V ou 220V) e, portanto, este efeito é amplificado. A corrente nessa situação se torna exorbitante, maior que os condutores podem suportar.

Caso perdure por muito tempo, os condutores se aquecem excessivamente, devido ao efeito joule, e podem se romper, danificando o motor.

Funcionamento do motor em corrente alternada

Ligar os enrolamentos de campo e armadura em série e então ligá-los com a fonte de tensão alternada. Na corrente alternada, a inversão do sentido da corrente acontece para os dois enrolamentos simultaneamente. Desta forma, o sentido do torque permanece inalterado. Mantendo a rotação deste motor. Para inverter o sentido de rotação do motor, é necessário inverter a alimentação do enrolamento de campo ou enrolamento de armadura no circuito série. Caso seja invertido apenas a alimentação da fonte, mantendo a alimentação das bobinas, o motor não terá seu sentido alterado.

Explicar que este motor, quando ligado em série, também é chamado de **motor universal**, pois funciona adequadamente em corrente contínua ou corrente alternada.

Circuito retificador de meia onda

Para essa demonstração, é necessário que o motor seja ligado em corrente alternada, portanto, deve ser ligado em série. Importante ressaltar aos alunos que esse esquema é realizado em liquidificadores simples de duas velocidades.

Na demonstração, efetuar a ligação mostrada na figura 1.16.

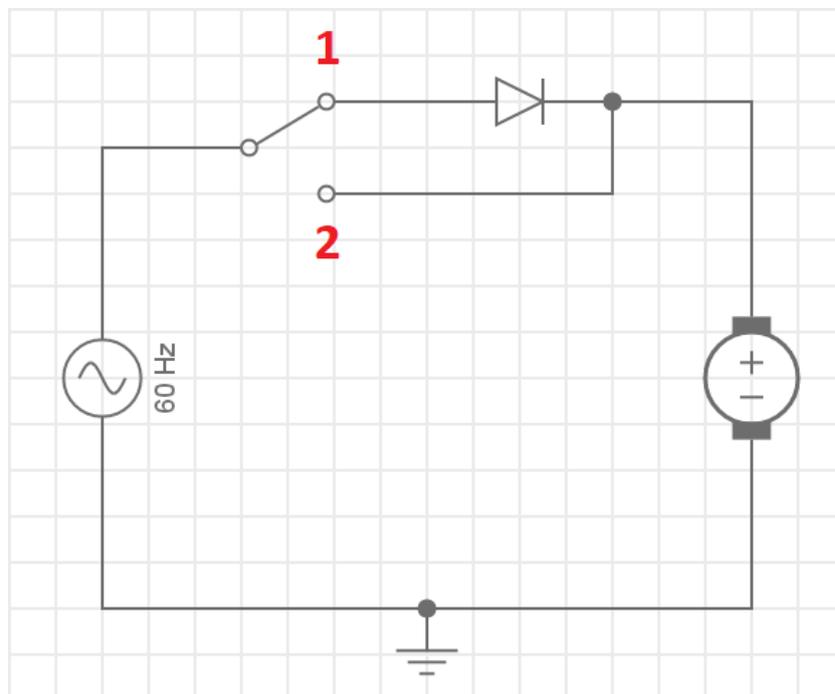


Figura 1.16: Circuito elétrico equivalente de um liquidificador de duas velocidades.

Ajuste a fonte para que forneça em torno de 30V. A chave de dois estados controlará a potência mecânica desenvolvida pelo motor. Caso o motor seja alimentado através do diodo, sua velocidade de rotação será baixa. Caso seja ligado de forma direta, ele rodará mais rápido. A ligação deste circuito está apresentada na figura 1.17

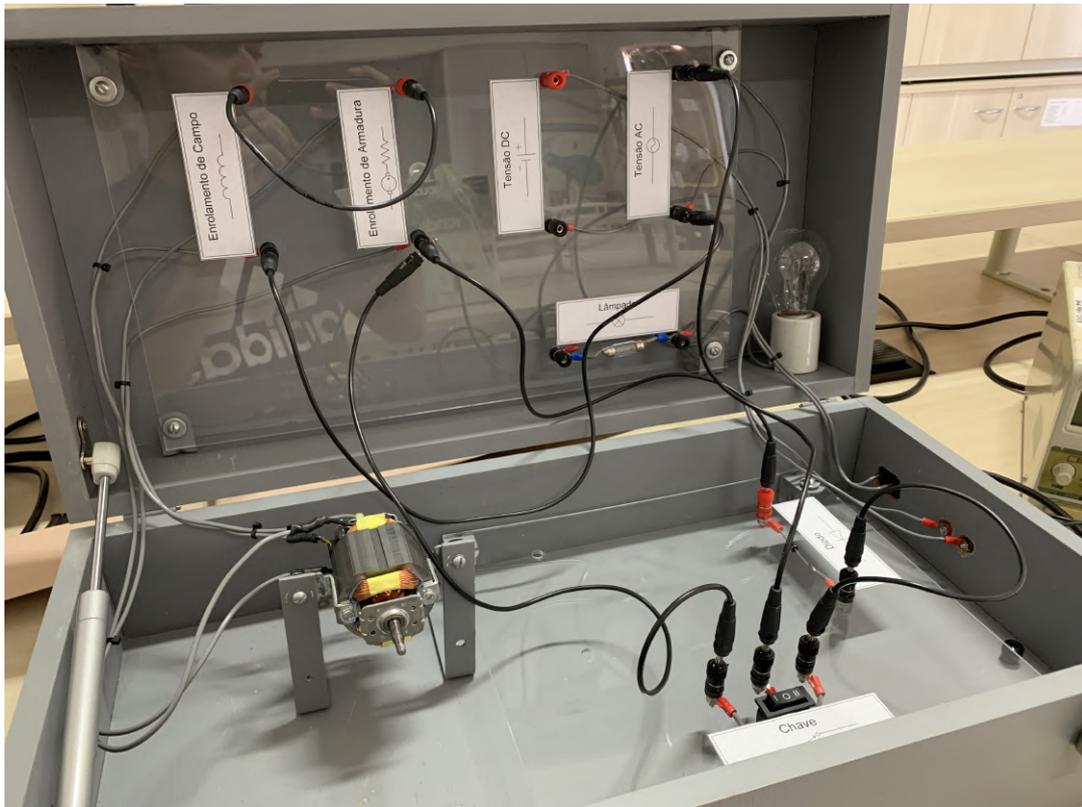


Figura 1.17: Circuito elétrico de um liquidificador de duas velocidades.

1.4.5 Aula 5

Correntes parasitas

Essas correntes aparecem quando o campo magnético presente no núcleo magnético da máquina é variante no tempo, conforme já explicado. Na demonstração, o professor primeiramente deve ligar o enrolamentos de campo e enrolamento de armadura em série. E então ligar o motor em 30V em corrente contínua e deixar ele rodando por 10 minutos. Desligue o motor e sinta a temperatura do núcleo magnético com as mãos. Ele estará próximo a temperatura ambiente. haverá um certo aquecimento, pois os enrolamentos irão esquentar devido a corrente que circulará por eles e então o calor será transferido por condução ao núcleo magnético. Explique aos alunos que não há emissão de calor por parte do núcleo magnético. Espere alguns minutos para que a temperatura volte a a temperatura ambiente.

Então, ligue o motor em corrente alternada na mesma tensão e espere por 3 minutos. Logo em seguida, desligue o motor e encoste novamente no núcleo magnético dele. A temperatura percebida será mais alta comparada ao funcionamento em corrente contínua. Explique o motivo desse maior aquecimento. Cite a lei de indução eletromagnética de Faraday e as correntes parasitas. Ressalte a importância da laminação do núcleo magnético para reduzir essas correntes induzidas. Na confecção deste material, é adicionado impurezas que prejudicam sua característica elétrica, tornando-o mais resistivo, colaborando com a redução das correntes parasitas.

Neste experimento, seria interessante possuir um termômetro digital por infravermelho para medir a temperatura e mostrar ao alunos mais facilmente. Entretanto, caso não tenha, utilize o tato.

Campo magnético residual

O professor poderá mostrar esse fenômeno com a ação motora e ação geradora da máquina. Neste experimento, você deve ligar o enrolamento de campo em corrente contínua. Insira 2,5A neste enrolamento e espere uns 30 segundos. Desligue a fonte. Na ação motora, com o enrolamento de campo desligado, ligue a fonte de corrente contínua no enrolamento da armadura. O motor pode iniciar a rotação. Caso não se movimente no primeiro momento, rode o eixo com a mão, fornecendo-o um pequeno torque de partida. E então o motor começará a se movimentar sozinho. Na ação geradora, depois de energizar o enrolamento de campo por 30 segundos, ligue um voltímetro na escala de milivolts e posicione seus terminais no enrolamento de armadura. Rode o eixo da máquina com as mãos e observe no display do voltímetro uma pequena tensão induzida.

Caso utilize o sistema de enquetes, segue algumas perguntas a serem realizadas antes da demonstração:

- O motor será capaz de funcionar sem a alimentação no enrolamento de campo?
- Ao rotacionar o eixo da máquina, haverá tensão induzida nos enrolamentos de armadura?
- (depois da demonstração, pergunte) Há campo magnético residual no núcleo magnético da máquina?

Função geradora

Nesta demonstração, é necessário energizar o enrolamento de campo com 2,5A. Ligue o enrolamento de armadura com a lâmpada incandescente. Neste caso, é preferível utilizar uma lâmpada de baixa potência e baixa tensão nominal, caso contrário, o brilho será pouco expressivo. Acople mecanicamente o mandril da furadeira no eixo da máquina e acione-a. Observe o brilho que surgirá na lâmpada. Explique a lei de indução eletromagnética de Faraday. Relacione a velocidade de rotação com o brilho da lâmpada, quanto mais rápido, maior a tensão induzida e, conseqüentemente, maior o brilho.

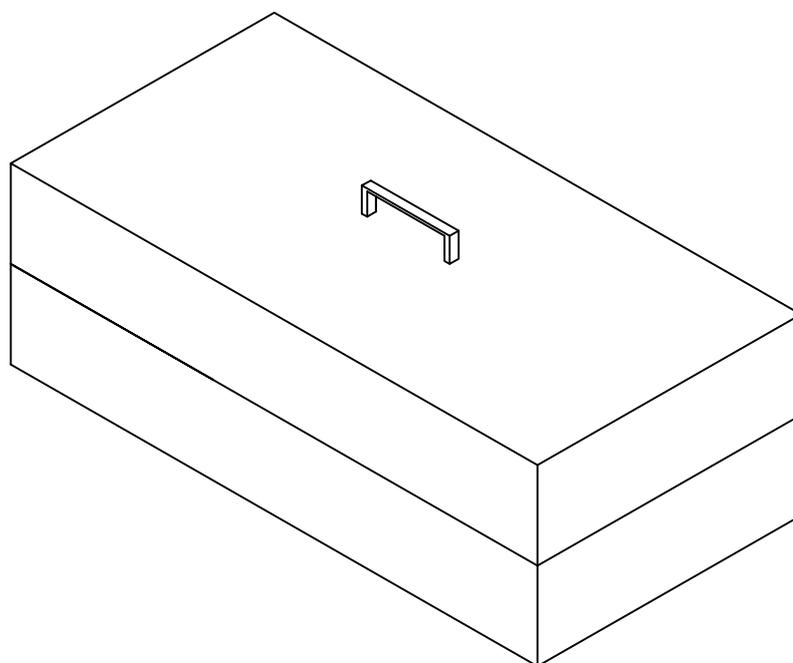
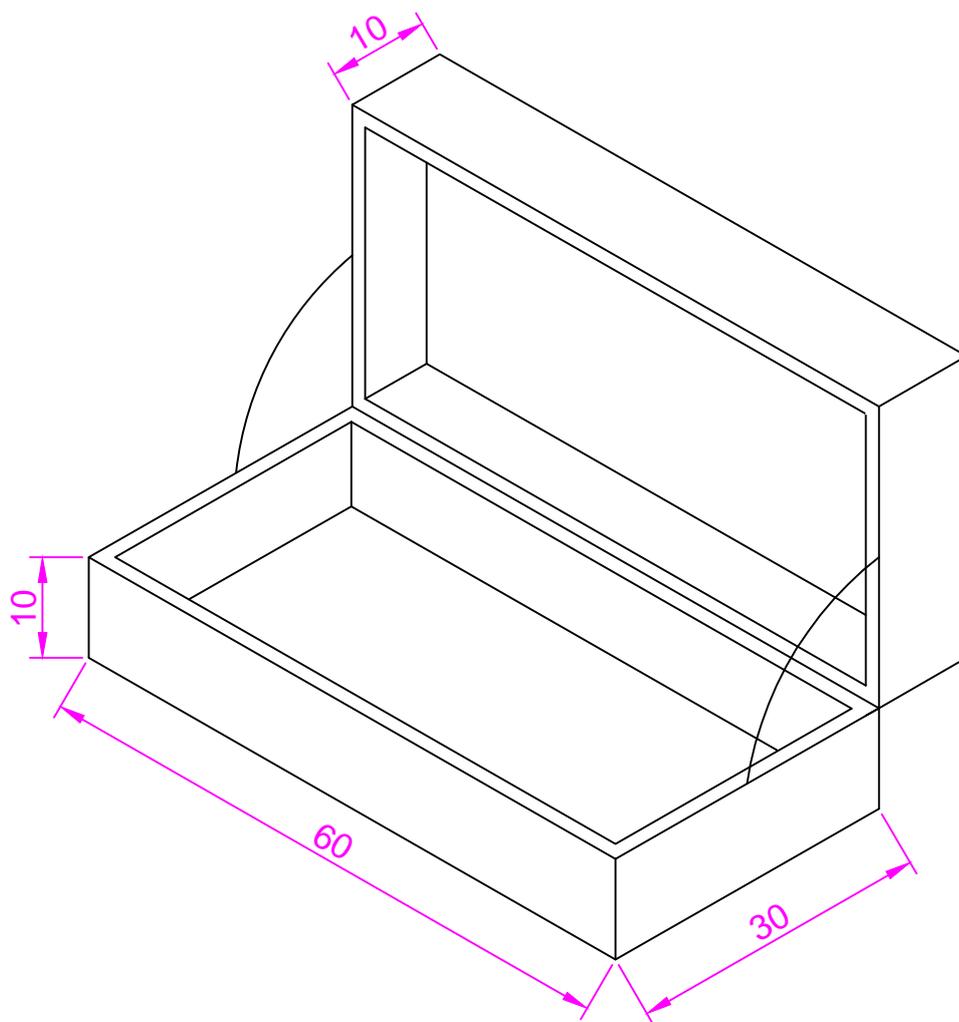
Referências

AGARWAL, P. D. Eddy-current losses in solid and laminated iron. **Transactions of the American institute of electrical engineers, Part I: Communication and Electronics**, IEEE, v. 78, n. 2, p. 169–181, 1959.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Electronic devices and circuit theory**. [S.l.]: Prentice Hall, 2012.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

STOJILOVIC, N.; ISAACS, D. E. Resistance of a digital voltmeter: teaching creative thinking through an inquiry-based lab. **Physics Education**, IOP Publishing, v. 53, n. 5, p. 053005, 2018.



TÍTULO: Dimensões da Maleta

RESPONSÁVEL TÉCNICO: Murilo Araujo Santos

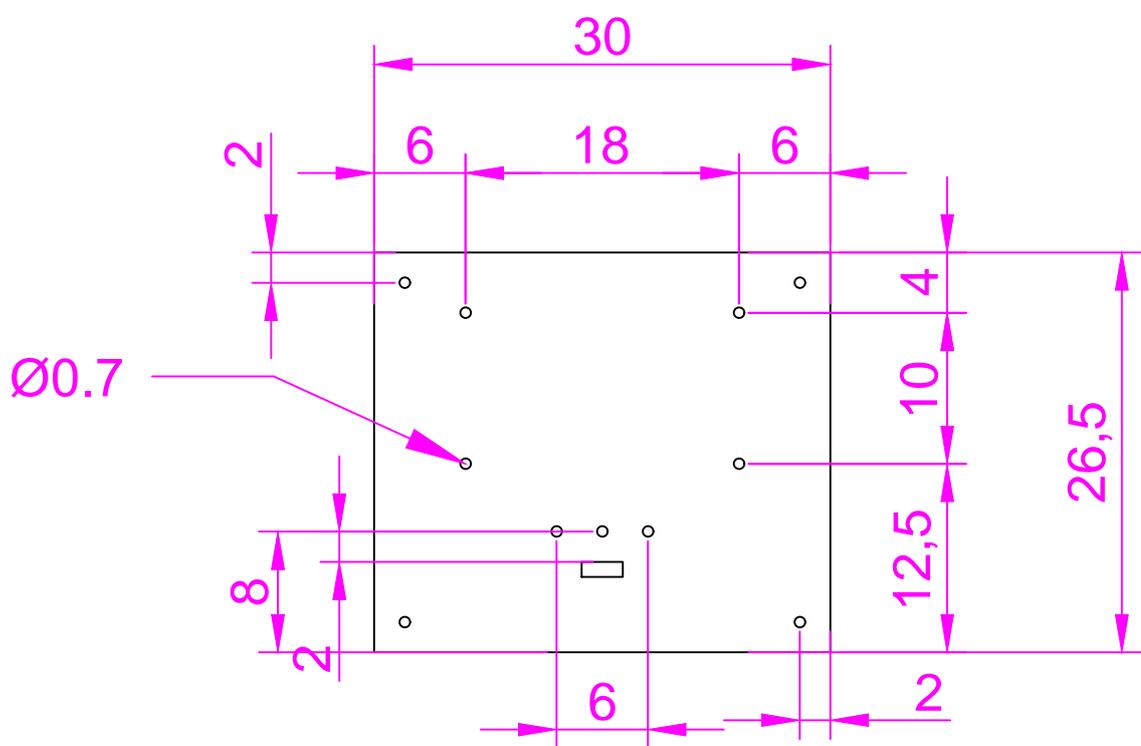
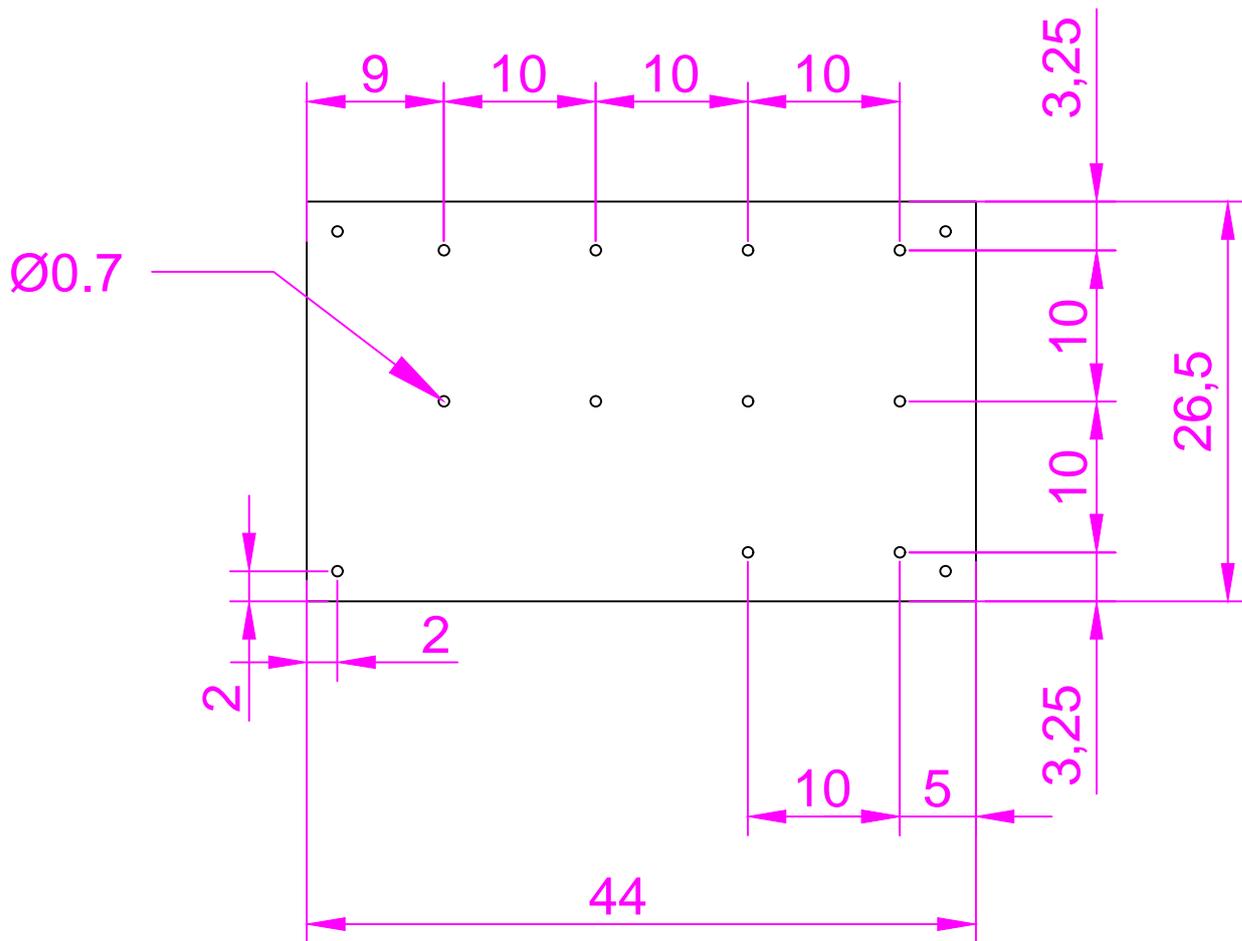
ASSUNTO: Produto Educacional

ESCALA: 1:75

FOLHA: 01/03

UNIDADES EM: Centímetros

DATA: 15/06/21



TÍTULO: Dimensões das Placas de Acrílico

RESPONSÁVEL TÉCNICO: Murilo Araujo Santos

ASSUNTO: Produto Educacional

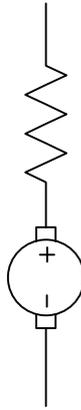
ESCALA: 1:50

FOLHA: 02/03

UNIDADES EM: Centímetros

DATA: 15/06/21

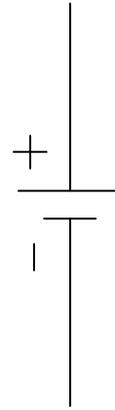
Enrolamento de Armadura



Enrolamento de Campo



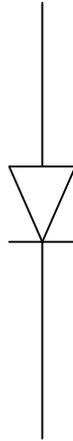
Tensão DC



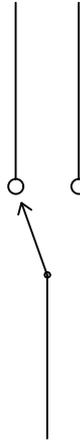
Tensão AC



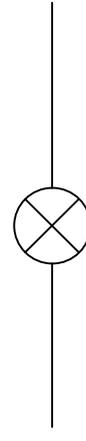
Diodo



Chave



Lâmpada



TÍTULO:

Etiquetas

RESPONSÁVEL TÉCNICO:

Murilo Araujo Santos

ASSUNTO:

Produto Educacional

ESCALA:

1:1

FOLHA:

03/03

DATA:

15/06/21