# ABERTURA E EXTINÇÃO DE ARCO VOLTAICO COMO FERRAMENTA DE APRENDIZADO NO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFMT: UM TRABALHO DE MONITORIA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4570

Luiz César de Matias Alves - luiz.alves1@sou.ufmt.br
UFMT Universidade Federal de Mato Grosso

Luan Bastos Marques - luanmarques04@gmail.com
UFMT Universidade Federal de Mato Grosso

Walkyria Krysthie Arruda Gonçalves Martins - wkagm@yahoo.com.br
UFMT Universidade Federal de Mato Grosso

***Resumo:*** *O presente trabalho tem por escopo a apresentação e análise de um projeto desenvolvido no programa de monitoria 2022-2023 na disciplina de Eletricidade e Magnetismo, ofertada pelo departamento de Engenharia Elétrica da UFMT (Universidade Federal de Mato Grosso). Com a implementação do novo Projeto Pedagógico de Curso, a disciplina passa a ter uma carga horária de 32h de aulas exclusivamente práticas em ambiente de laboratório, agregando maior ênfase às atividades experimentais. A disciplina tem conteúdo que exige do discente do curso bons conhecimentos em Análise Vetorial e Cálculo Integral e, além disso, capacidade de assimilar fenômenos físicos de difícil visualização, fazendo com que grande parte dos alunos encontre dificuldade em abstrair o conteúdo. Nesse sentido, tem havido um esforço por parte do monitor e professor em desenvolver recursos para serem usados nas aulas de laboratório, com o objetivo de abordar a disciplina sob um ponto de vista menos abstrato, permitindo assim uma análise observativa por parte dos alunos. Com isso, foi concebido um conjunto didático para montagem de algumas experiências para laboratório que permite desde a observação do processo de abertura da chave de um indutor nas situações com arco e sem arco voltaico até a análise da extinção do mesmo através do sopro magnético. O conjunto permite a montagem do experimento passo a passo e também alteração na configuração e disposição de cada elemento, abrindo espaço para discussão e análise dos resultados de cada alteração na montagem.*

***Palavras-chave:*** *Corrente Indutiva, Arco Voltaico, Sopro Magnético*

# IGNIÇÃO E EXTINÇÃO DE ARCO VOLTAICO COMO FERRAMENTA DE APRENDIZADO NO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFMT: UM TRABALHO DE MONITORIA

## 1 INTRODUÇÃO

O Departamento de Engenharia Elétrica da UFMT oferece a disciplina de Eletricidade e Magnetismo que, para o discente do curso, além de ser o primeiro contato com um conteúdo específico, é também fundamento e pré-requisito para grande parte da estrutura curricular. A disciplina que possuía carga horária de 96h, das quais 64h eram aulas teóricas expositivas e 32h eram aulas experimentais em laboratório, com a alteração do Projeto Pedagógico de Curso, sofreu desmembramento da sua carga horária original, de modo que as 32h destinadas às aulas experimentais passam a representar um novo componente curricular denominado Laboratório de Eletricidade e Magnetismo. Com essa alteração, não só os conteúdos trabalhados na seção teórica da disciplina passaram a ser abordados em laboratório de modo mais enfático, permitindo aos discentes maiores análises observativas dos fenômenos eletromagnéticos abordados em sala de aula proporcionando questionamentos a respeito dos fenômenos observados e validando os modelos apresentados teoricamente, como também viabilizou-se a maior ocorrência de visitas técnicas que corroboram para a integração da teoria e da prática, onde o estudante pode observar as condições reais, com problemas reais, que necessitam de um embasamento teórico para soluções eficazes e eficientes. Ao final desse período o aluno deve estar capacitado a compreender e resolver problemas relacionados ao eletromagnetismo básico.

Nesse contexto, os monitores da disciplina têm a função de dar suporte ao aluno no sentido de dirimir dúvidas que possam sobrevir, além de acompanhar a execução e montagem de experimentos em laboratório. Desse contato direto com o aluno da disciplina de Eletricidade e Magnetismo, foi constatada a dificuldade que ele tem em visualizar e, consequentemente, em entender o funcionamento de certos dispositivos empregados nos complexos elétricos.

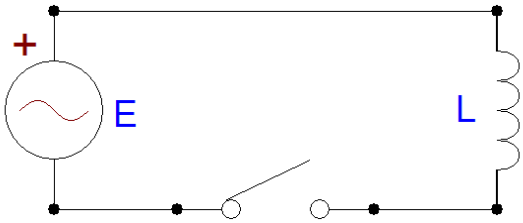
Somado a isso, apesar da existência de excelentes conjuntos didáticos disponíveis no mercado, verifica-se que, além do alto custo, em muitos casos ou os kits são muito simples e muito distantes da realidade, ou as partes componentes se encontram encapsuladas em invólucros, o que não permite a visualização dos detalhes relevantes ao entendimento do seu funcionamento.

Diante disso, vem sendo dedicado parte dos trabalhos de monitoria, também no desenvolvimento de dispositivos didáticos a partir de peças de descarte do laboratório e até mesmo sucatas, com o objetivo de elucidar as principais questões. Para alcançar tal objetivo, foi concebido um conjunto didático de uma chave seccionadora e dispositivo de extinção de arco voltaico com o propósito de permitir tanto a visualização do processo de abertura de uma chave em um circuito indutivo nas situações com e sem estabelecimento de arcos quanto a análise da extinção do mesmo através do sopro magnético. Tal conjunto pode ser utilizado em várias experiências as quais são providas de um roteiro que orienta na montagem do dispositivo almejado. A ideia principal do conjunto didático apresentado neste trabalho é minimizar as frequentes dificuldades que o discente da disciplina encontra na observação e análise dos fenômenos físicos “não palpáveis” e, ao mesmo tempo, atentar para os fatores que podem influenciar no estabelecimento e extinção de um arco elétrico.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O arco elétrico, gerado através da interrupção abrupta de um circuito percorrido por corrente de natureza indutiva "Figura 01", pode ser estabelecido em diversos meios, não ficando limitado ao ambiente atmosférico. Para a observação deste fenômeno, faz-se necessário que um caminho alternativo seja estabelecido em um meio isolante para a corrente elétrica que, devido a aplicação de um campo elétrico suficientemente forte, é capaz de romper a rigidez dielétrica do meio isolante em questão.

Figura 01 - Exemplo de um circuito puramente indutivo.

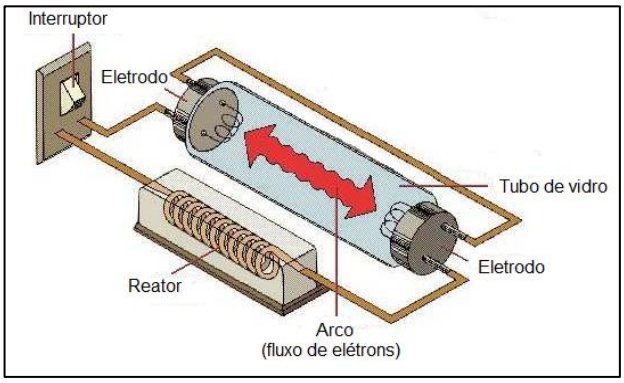



Fonte: O Autor

Em circuitos indutivos, o armazenamento de energia na forma de campo magnético é proporcional ao quadrado da corrente que o percorre, de modo que, uma interrupção - a exemplo de uma manobra de abertura de chaves seccionadoras - implica em uma variação súbita nos valores de corrente e, por consequência, do fluxo magnético. De acordo com o princípio de Faraday para a Indução eletromagnética, essas condições são bastantes para que uma diferença de potencial (DDP) elevada surja entre os terminais de um interruptor promovendo desta forma, a ionização do meio.

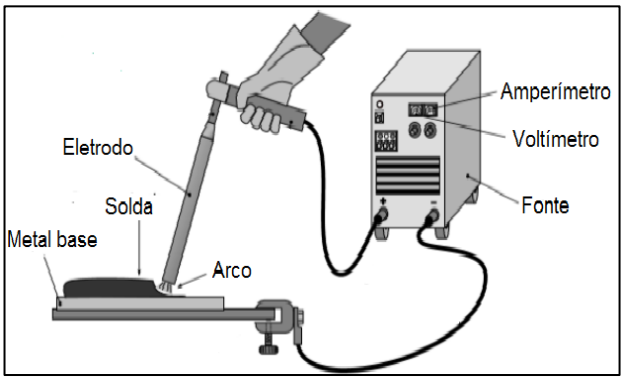
Este fenômeno possui inúmeras aplicações práticas, seja em objetos de uso cotidiano, como lâmpadas fluorescentes "Figura 2a", seja em equipamentos industriais como fornos a arco ou em equipamentos de solda "Figura 2b".

Figura 2 - Aplicações




(a) Ilustração de Arco elétrico em lâmpada fluorescente.

Fonte:http://www.geocities.ws/saladefisica7/funciona/fluorescente.html – Adaptada.

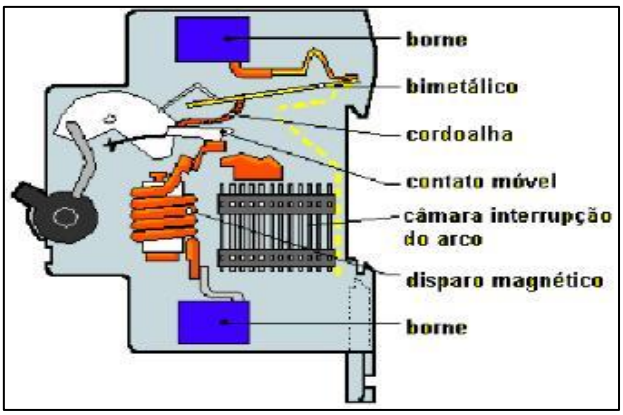



(b) Ilustração de equipamento de Solda a Arco.

Fonte:https://carbografite.com.br/blog/detalhe/introducao-a-soldagem/ - Adaptada.

Apesar de aplicável, nem sempre o arco voltaico é desejável. Sua ocorrência é, por vezes, prejudicial para os sistemas eletrônicos e enseja cuidados em ambientes de trabalho, a exemplo das operações nas subestações “Figura 03a". Em vista disso, estratégias para a mitigação deste fenômeno são frequentemente aplicadas, e podem ser encontradas em diferentes ambientes, seja em equipamentos de alta tensão em usinas e subestações, seja em ambiente doméstico em disjuntores termomagnéticos convencionais “Figura 3b” . Uma delas é o sopro magnético que se faz valer da Lei de Ampére segundo o conceito de campo. Esta estratégia consiste na aplicação de uma força sobre um elemento diferencial de corrente na presença de um campo magnético. Neste caso, o arco elétrico voltaico formado entre os terminais da chave seccionadora é extinto ao criar-se um campo magnético que promove sobre as cargas a ação de uma força perpendicular tanto à corrente quanto ao próprio campo.

Figura 3 – Dispositivos seccionadores




(a) Arco elétrico durante manobra de abertura de chave seccionadora em ambiente de subestação.

Fonte:https://viverdeeletrica.com/wpcontent/uploads/2022/09/o-que-e-umarcoeletrico21024x576.jpg

(b) Aspectos construtivos de disjuntor termomagnético com recurso para extinção de arco voltaico.

Fonte:https://universoeletrico.wordpress.com/2016/07/29/disjuntores-de-baixa-tensao/

### 2.1 Ignição do arco voltaico

Sabendo que o fluxo magnético $\Phi$ que atravessa uma área $\boldsymbol{S}$ é equivalente ao resultado da integral de superfície do produto escalar entre a densidade de fluxo magnético $\boldsymbol{B}$ e o elemento infinitesimal de área $d\boldsymbol{S}$, podemos escrever a “Equação (1)”:

$$\phi = \int \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} \quad \left[\frac{Wb}{m^2}\right] \tag{1}$$

Sabendo, ainda, que, pela lei de Faraday/Lenz, o estabelecimento de uma força eletromotriz $fem$ entre os terminais de uma chave seccionadora de um dado circuito é bastante que haja um caminho fechado qualquer enlaçado por um fluxo magnético $\Phi$ variante no tempo $\boldsymbol{t}$ , temos então a “Equação (2)”:

$$fem = -\frac{d\phi}{dt} \quad [V] \tag{2}$$

O sinal negativo indica que a $fem$ está em uma direção (ou possui polaridade) tal a produzir um fluxo magnético de oposição à variação do fluxo original.

Uma vez que a força eletromotriz $fem$ é definida como uma tensão induzida em um caminho fechado, podemos expressá-la no formato da "Equação (3)" que segue:

$$fem = \oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{L} \tag{3}$$

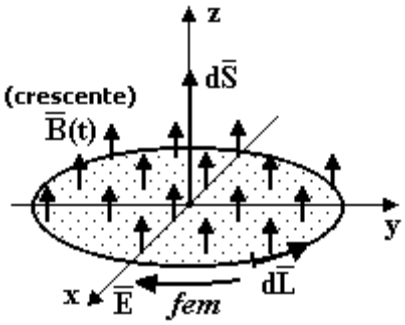
Onde $\boldsymbol{E}$ representa o campo elétrico e $d\boldsymbol{L}$ um elemento infinitesimal de comprimento.

Substituindo a "Equação (1) na "Equação (2)", considerando a "Equação (3)", escreveremos a tensão induzida do arco elétrico da seguinte forma:

$$fem = \oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{L} = -\frac{d}{dt}\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{S} \quad [V] \tag{4}$$

Vale ressaltar que, o sentido do elemento diferencial de comprimento $d\boldsymbol{L}$ deve sempre concordar com o sentido de $d\boldsymbol{S}$ de acordo com a "regra da mão direita" conforme o representado pela "Figura 4".

Figura 4 - De acordo com a regra da mão direita, os dedos indicam a posição do caminho fechado $d\boldsymbol{L}$ e o polegar indica a direção de $d\boldsymbol{S}$.




Fonte: MARTINS, W. K .A. G, Apostila de Eletricidade e Magnetismo.

Passando a derivada para dentro da integral de superfície do lado direito da "Equação (4)", obtemos a "Equação (5)" que escreve a força eletromotriz na forma integral da lei de Maxwell:

$$fem = \oint_C \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{L} = -\int_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{S} \tag{5}$$

Onde **C** representa o contorno da área plana no qual a integral de linha é calculada e **S** a área plana limitada pelo contorno onde a integral de superfície é calculada.

A fim de relacionar a indutância **L** do circuito experimental com a tensão induzida observada entre os pontos 1 e 2 do circuito experimental, escrevemos a "Equação (6)" onde **I** representa a corrente indutiva que percorre o circuito e **N** o número de espiras do indutor:

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad [\mathrm{H}] \tag{6}$$

A equação da indutância pode ser obtida também a partir da energia no campo magnético WH devido a corrente **I** que flui no circuito fechado, obtendo assim a "Equação (7)":

$$w_H = \frac{LI^2}{2} \ [\mathrm{J}] \tag{7}$$

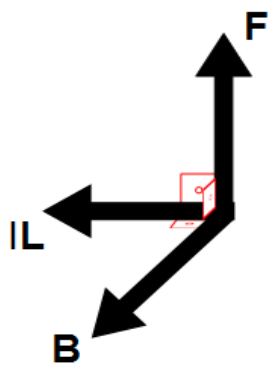
Da "Equação (7)", verifica-se que a energia armazenada na forma de campo magnético em um circuito indutivo é diretamente proporcional ao quadrado do valor da corrente que o percorre. Quando as condições descritas pela "Equação (2)" são satisfeitas, a energia armazenada no elemento indutivo é dissipada na forma de luz e calor . A esta dissipação, que é perceptível a olho nu, atribui-se a alcunha de Arco Elétrico também conhecido como arco voltaico.

### 2.2 Extinção do arco voltaico por sopro magnético

De acordo com a teoria do Eletromagnetismo, é sabido que, uma corrente elétrica $I$ na presença de um campo magnético $\boldsymbol{B}$ sofre a ação de uma força $\boldsymbol{F}$ e que o sentido desta força pode ser obtido pela regra da mão direita do produto vetorial conforme descrito pela "Equação (8)" e ilustrado pela "Figura 5".

$$\boldsymbol{F} = I\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B} \ [\mathrm{N}] \tag{8}$$

Figura 5. Ilustração da "Regra da Mão direita" do produto vetorial.




Fonte: O autor.

Para uma situação em que um fluxo de cargas elétricas representado por uma corrente $I$, na presença de um dado campo magnético, as cargas sofrerão a ação de uma força que será perpendicular tanto à corrente quanto ao campo magnético.

O módulo desta força pode ser calculado através da "Equação (9)", onde $\theta$ , representa o ângulo entre os vetores $\boldsymbol{L}$ e $\boldsymbol{B}$ e o sentido da força $\boldsymbol{F}$ é determinado pela regra do produto vetorial, indo de $\boldsymbol{L}$ para $\boldsymbol{B}$.

$$F = BIL \sin\theta \tag{9}$$

## 3 CONJUNTO DIDÁTICO CONCEBIDO

O dispositivo eletromecânico concebido no programa de monitoria da disciplina de Eletricidade e Magnetismo consiste em um conjunto didático para montagem em bancada de laboratório e que tem o objetivo de permitir a visualização do estabelecimento do arco voltaico durante a abertura de uma chave seccionadora e, ainda, o funcionamento de um dispositivo extintor desse arco via sopro magnético. Os componentes deste conjunto são:

- 1 núcleo de ferro (tipo U);
- 1 bobina 600/600 espiras;
- 1 retificador monofásico;
- 3 reatores para lâmpada de descarga;
- 1 chave seccionadora (dispositivo seccionador confeccionado com uma "segueta" e contatos de platinado) para a manobra.

Para montagem completa das experiências também são utilizadas fontes de corrente contínua (CC), varivolt monofásico, instrumentos de medição e cabos com pinos do tipo "banana".

## 4. DESENVOLVIMENTO

O objetivo principal das aulas de laboratório é fazer com que o discente desenvolva a capacidade de analisar a aplicação do conteúdo estudado em sala. Esse tipo de abordagem mais prática e observativa se faz necessário, pois o conteúdo teórico da disciplina exige que o aluno esteja familiarizado e consiga abstrair conceitos como o de armazenamento/dissipação de energia, indução eletromagnética e força magnética, o quais foram amplamente explorados no desenvolvimento desta bancada de laboratório.

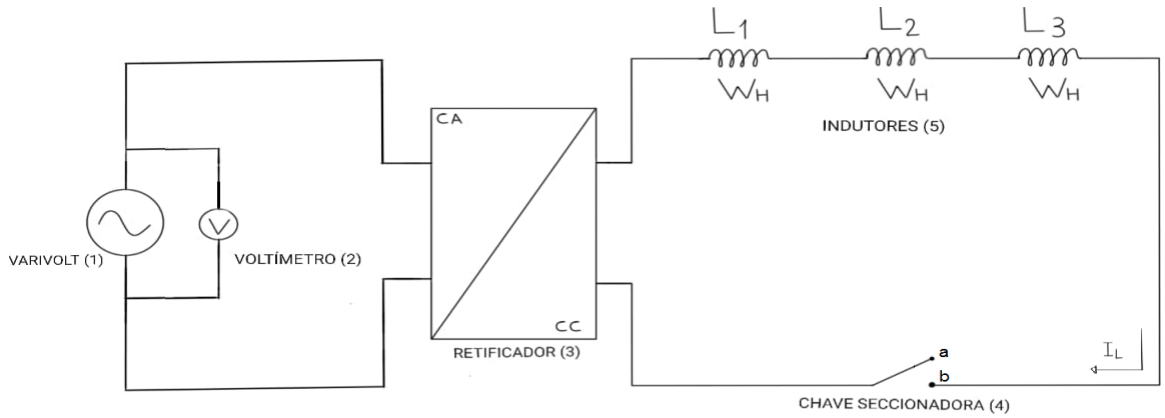
### 4.1 Ignição do arco voltaico devido à abertura de corrente indutiva com dispositivo seccionador didático

Para a realização desta etapa do experimento, o circuito montado "Figura 6a" e "Figura 6b" fez-se valer de um varivolt monofásico "(1)" para regular a tensão a ser aplicada ao circuito. Um multímetro digital "(2)" foi conectado em paralelo aos terminais de saída deste componente a fim de se monitorar a magnitude da tensão fornecida pelo equipamento. De modo a majorar a intensidade do arco, um retificador "(3)" em formato de

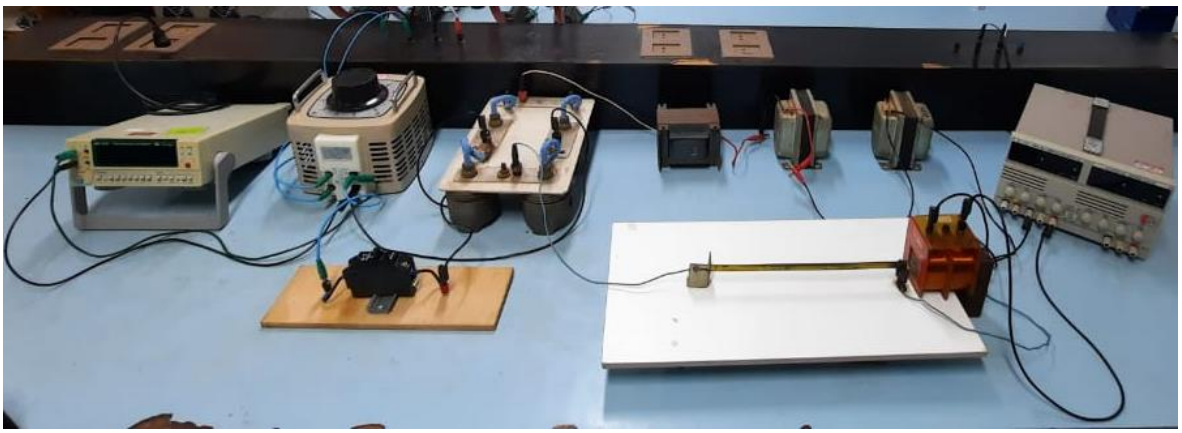
ponte de diodos foi conectado ao varivolt. Na saída contínua do retificador, os três reatores "(5)" supracitados foram ligados em série de modo a aumentar a indutância **L** do circuito. Finalmente, o dispositivo seccionador "(4)" foi adicionado ao arranjo.

Para esta experiência, tanto os reatores quanto o dispositivo seccionador foram concebidos a partir do reaproveitamento de sucatas e de materiais elétricos em condição de descarte, o que contribuiu para a redução de custos com material de laboratório e permitiu a melhor observação dos fenômenos eletromagnéticos abordados na parte teórica da disciplina.

Figura 6 – Circuitos Experimentais.




(a) 8. Diagrama esquemático do circuito com a identificação dos componentes utilizados.
Fonte: O autor.

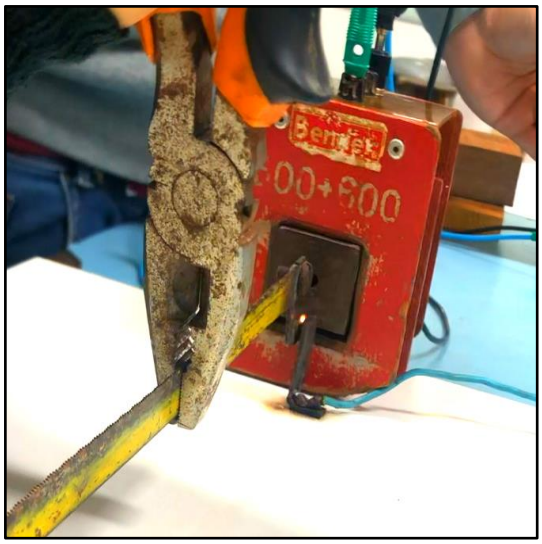


(b) Circuito prático montado em laboratório.
Fonte: O autor

Concluída a montagem do circuito experimental, o mesmo pode então ser então energizado. Verificadas as condições necessárias para o estabelecimento do arco elétrico, a manobra de abertura da chave pôde então ser realizada. Cuidadosamente, com o auxílio de um alicate universal para agarrar a "segueta", o contato móvel foi deslocado de modo a

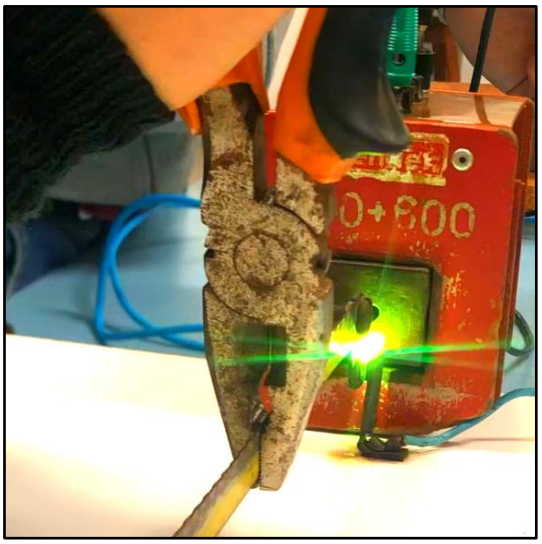
separá-lo do contato fixo do interruptor. De imediato observou-se o estabelecimento do arco elétrico conforme imagens apresentadas na “Figura 7”.

Figura 7 – Estabelecimento do arco voltaico



(a) Início do arco

Fonte: O autor.



(b) Arco estabelecido

Fonte: O autor.

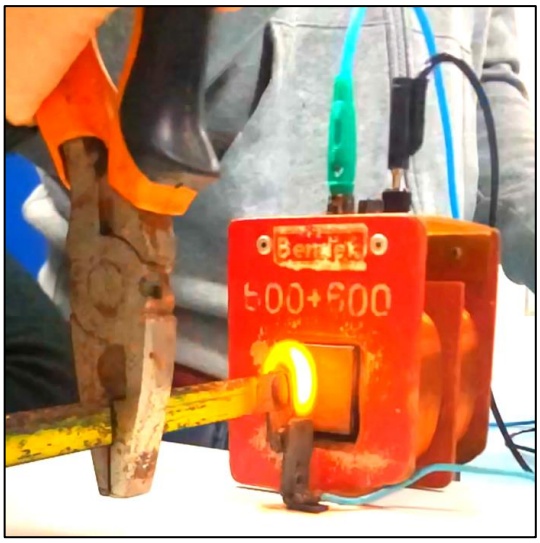
Em todas as situações testadas foram corroborados os conteúdos vistos em sala de aula, de uma maneira clara e simples. Neste caso, o aluno da disciplina pode perceber a influência de cada parâmetro no processo de dissipação da energia, ora armazenada no campo magnético dos indutores, na forma de luz e calor entre os contatos do dispositivo seccionador didático.

### 4.2 Extinção do arco voltaico através de um dispositivo de sopro magnético didático

A realização desta etapa do experimento compreendeu o dispositivo gerador de sopro magnético que foi montado com o intuito de se aplicar um campo magnético de orientação perpendicular ao caminho da corrente de descarga do arco elétrico. Conforme o disposto na seção teórica, a aplicação deste campo ocasiona o surgimento de uma força cujo efeito é o alongamento do caminho do fluxo de cargas (arco) e a consequente extinção do arco elétrico entre os terminais “(a)” e “(b)” da chave seccionadora.

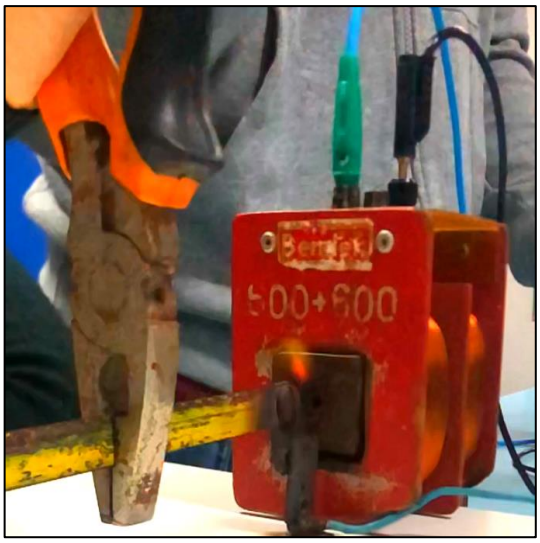
Para tanto, uma bobina com 1200 (mil e seiscentas) espiras juntamente com um núcleo de ferro tipo U, foi posicionada nas proximidades dos contatos abertos do dispositivo seccionador. Essa bobina foi alimentada por uma fonte CC que, ao ser acionada concomitantemente com o arco voltaico, produz um campo magnético com subsequente ação da força magnética responsável por promover a efetiva extinção do fenômeno elétrico em tela, como mostra a “Figura 8”:

Figura 8 – Extinção do arco voltaico



(a) Acionamento do sopro magnético.

Fonte: O Autor.



(b) Extinção do arco voltaico pelo sopro magnético.

Fonte: O Autor.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto didático concebido pelo programa de monitoria da disciplina de Eletricidade e Magnetismo do curso de Engenharia Elétrica da UFMT e apresentado neste artigo mostrou-se simples e eficaz no processo ensino/aprendizagem no que tange às questões da Lei de Faraday às vistas de uma interrupção de corrente indutiva. Os alunos da disciplina demonstraram maior interesse pelo assunto por terem a possibilidade visualizar os efeitos de arcos voltaicos, além de observar o funcionamento e os aspectos construtivos de um dispositivo extintor destes arcos por meio do sopro magnético. Ademais, puderam perceber a possibilidade de desenvolver tais dispositivos a partir de componentes, aparentemente, sem utilidade, reaproveitando materiais e reutilizando peças e itens que seriam alvo de descarte. Durante o período de concepção e confecção do conjunto didático, pode-se verificar um grande interesse e envolvimento de outros alunos da graduação no sentido de se preparar ações de extensão para a comunidade externa à UFMT, para além daqueles da própria disciplina. Isso despertou, também, o interesse deles em participar do programa de monitoria e projetos de extensão com vistas ao desenvolvimento de novos dispositivos que cooperem para o processo de ensino/aprendizagem e popularização do conhecimento. Finalmente, o desenvolvimento deste projeto proporcionou a motivação do próprio monitor ao constatar a sua grande contribuição no ensino de Engenharia Elétrica na UFMT, para além dos momentos de atendimento ao aluno.

### 5.1 Metodologia empregada e análise dos resultados

Participaram da experiência, os discentes devidamente matriculados na disciplina prática de Eletricidade e Magnetismo. Divididos em 3 turmas de aproximadamente 12 alunos. Para cada uma das turmas, professor e monitor realizaram a montagem do experimento na bancada do laboratório na presença dos alunos que, em posse do roteiro de aula disponibilizado previamente puderam acompanhar a montagem e observar os aspectos construtivos de cada um dos componentes ali dispostos.

Uma vez montado e conferido, o professor pode iniciar a demonstração do arco voltaico e do dispositivo de extinção para os alunos ali presentes que, não só analisaram a ocorrência dos fenômenos como também auxiliaram o docente durante a realização do experimento. Aos discentes foi sugerido que registrassem o experimento por meio de fotos, vídeos e anotações.

Como forma de quantificar e qualificar o sucesso dos estudantes após a realização do experimento, uma atividade avaliativa foi proposta no formato de relatório experimental. Aqueles que assistiram a aula prática estiveram aptos a responder a atividade, consolidando assim os conhecimentos adquiridos tanto nas teóricas quanto nas práticas.

Dentre os presentes e que fizeram a prova teórica, todos cumpriram com a atividade proposta respondendo satisfatoriamente às questões propostas. Isso mostra que o objetivo de melhorar o ensino da engenharia através do desenvolvimento de atividades práticas que levam ao aluno a oportunidade de abstrair conceitos chave para a Engenharia Elétrica além de viabilizar a assimilação dos conteúdos ministrados em sala de aula foi atingido com êxito. Verificou-se, portanto, que a elaboração dos dispositivos colaborou para a formação acadêmica tanto dos alunos quanto dos monitores envolvidos no projeto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANIMAE, Projeto de Extensão UFMT. **Eletricidade e Magnetismo, Ignição de um Arco Elétrico**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=lHCa70mw80o Acesso em: 29 mai. 2023.

ARIMATEIA, José., **Notas de Sala de Aula e Roteiros de Laboratório**.

BOYLESTAD, Robert. **Introdução à Análise de circuitos**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2018.

GUIMARÃES, Geraldo. **Apostila de Teoria e Exercícios Propostos de Eletromagnetismo**, UFU.

HAYT, William; BUCK, John. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

MARTINS, Walkyria. K .A. G, **Apostila de Eletricidade e Magnetismo**, UFMT 2008.

RECHE, Evandro A; BRIDI, Eder; MARTINS, Walkyria. Conversor Eletromecânico como Ferramenta de Aprendizado no Curso de Engenharia Elétrica da UFMT: Um Trabalho de Monitoria. In: XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2013, Gramado.

## OPENING AND EXTINGUISHING OF ELECTRIC ARC AS A TEACHING/LEARNING TOOL IN ELECTRICAL ENGINEERING: A MONITORSHIP WORK

***Abstract:*** *The scope of this work is the presentation and analysis of a project developed in the 2022-2023 monitoring program in the discipline of Electricity and Magnetism, offered by the Electrical Engineering department of UFMT (Federal University of Mato Grosso). With the implementation of the new Course Pedagogical Project, the course now has a workload of 32 hours of exclusively practical classes in a laboratory environment, adding greater emphasis to experimental activities. The subject has content that requires the course student to have good knowledge in Vector Analysis and Integral Calculus and, in addition, the ability to assimilate physical phenomena that are difficult to visualize, making it difficult for most students to abstract the content. In this sense, there has been an effort on the part of the monitor and professor to develop resources to be used in laboratory classes, with the objective of approaching the discipline from a less abstract point of view, thus allowing an observational analysis by the students. With that in mind, a didactic set was designed to set up some experiments for the laboratory, allowing from the observation of the process of opening the switch of an inductor in situations with and without arc, to the analysis of its extinction through magnetic blowing. The set allows the assembly of the experiment step by step and also changes in the configuration and disposition of each element, opening space for discussion and analysis of the results of each alteration in the assembly.*

***Key-words:*** *Monitorship Work, Electric Arc, Teaching/Learning.*