

ENERGIZAÇÃO DE CIRCUITO COM CORRENTE INDUTIVA COMO FERRAMENTA DE APRENDIZADO NO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFMT: UM TRABALHO DE MONITORIAS

1 INTRODUÇÃO

O Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMT oferta as disciplinas de Eletricidade e Magnetismo para alunos do 3º período e Circuitos Elétricos I para alunos do 4º período. É na disciplina de Eletricidade e Magnetismo que o discente do curso tem o primeiro contato com conteúdos do núcleo específico que serão alvos de discussões e aprofundamentos ao longo de todo o curso. Sequencialmente, surge a disciplina de Circuitos Elétricos I, que trata de conceitos e princípios que são igualmente fundamentais para a construção das habilidades requeridas ao engenheiro eletricitista. Estas duas matérias são pré-requisitos para grande parte da estrutura curricular dos cursos de Engenharia Elétrica.

Tais disciplinas possuíam 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, sofreram desmembramento da sua carga horária original, de modo que as 32h destinadas às aulas experimentais passaram a representar duas novas componentes curriculares. Com essa alteração, os conteúdos trabalhados na seção teórica da disciplina passaram a ser abordados em laboratório de modo mais enfático, permitindo aos discentes análises mais aprofundadas dos fenômenos e a verificação das leis e teoremas abordados em aula.

Nesse contexto, cabe aos monitores destas duas disciplinas dar suporte aos alunos no sentido de dirimir dúvidas que possam sobrevir, colaborando assim com a aprovação dos discentes nas disciplinas do curso. Desse contato direto com os alunos das disciplinas de Eletricidade e Magnetismo e Circuitos Elétricos I, foi constatada a dificuldade por parte dos alunos em visualizar e, conseqüentemente, entender os princípios de funcionamento de dispositivos comumente encontrados em projetos elétricos.

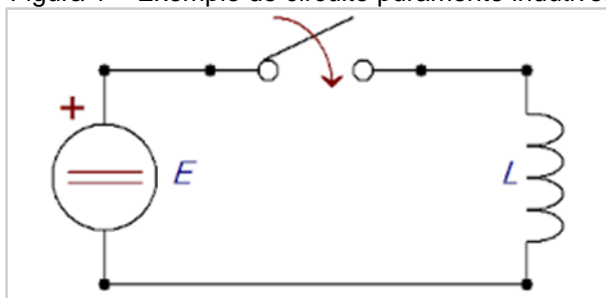
Diante disso, parte do trabalho de monitoria foi aplicado no desenvolvimento de uma bancada didática utilizando os materiais e ferramentas disponíveis em laboratório com o propósito de elucidar as principais questões levantadas pelos alunos. Para alcançar tal objetivo, um conjunto com indutores e lâmpadas incandescentes foi produzido de modo a permitir a visualização do atraso da corrente durante o processo de energização de circuito indutivo. Tal conjunto pode ser utilizado em várias experiências as quais são providas de roteiro que orienta a montagem do circuito desejado e conduz os alunos às conclusões pertinentes. A ideia principal da bancada apresentada neste trabalho é minimizar as frequentes dificuldades que os discentes das disciplinas encontram na observação e análise dos fenômenos físicos “não palpáveis”.

Por ser um assunto tratado nas duas disciplinas citadas anteriormente, um trabalho colaborativo entre os monitores destas duas componentes curriculares foi desempenhado. Tal trabalho promoveu aos estudantes a oportunidade de visualizar um fenômeno que é visto qualitativamente na disciplina de Eletricidade e Magnetismo e quantitativamente na disciplina de Circuitos Elétricos I.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O atraso da corrente que é ocasionado pela variação abrupta do fluxo magnético em um circuito elétrico pode ser observado em circuitos de natureza indutiva “Figura 1”, quando do fechamento da chave durante sua energização. Este fenômeno ocorre devido ao aparecimento de uma força eletromotriz no sentido de se opor ao crescimento da corrente em algum elemento indutivo.

Figura 1 – Exemplo de circuito puramente indutivo.

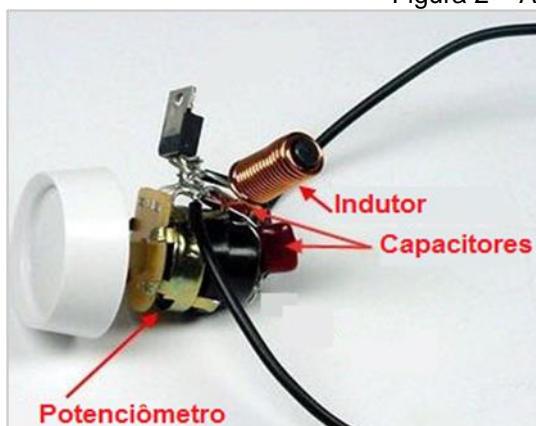


Fonte: O autor.

Um fluxo magnético que varia no tempo pode ser dado tanto em um circuito estacionário quanto através de um caminho que se move sob a ação de um campo magnético. Uma manobra de fechamento de chaves seccionadoras, por exemplo, pode ser enquadrada no primeiro destes casos, estabelecendo assim as condições necessárias para que uma diferença de potencial (DDP) surja entre os terminais de um indutor promovendo o atraso da corrente no circuito ou no ramo em que este elemento esteja inserido.

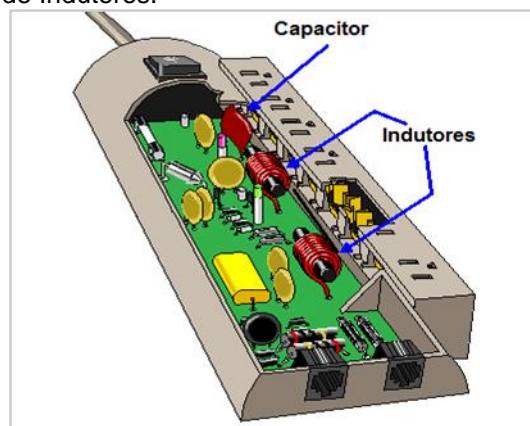
Este fenômeno possui inúmeras aplicações e pode se fazer presente em alguns objetos de uso cotidiano. Dentre eles, cita-se o dimmer residencial “Figura 2a” que utiliza um indutor para proteger uma carga a ele aplicada de surtos de corrente. O indutor também pode ser utilizado em projetos de filtros elétricos para bloquear ruídos de alta frequência “Figura 2b”, como visto nos circuitos dos populares filtros de linha.

Figura 2 – Aplicação de Indutores.



a) Ilustração da Aplicação de indutor em dimmer

Fonte: <http://www.michaelsharris.com/electronics/week3/triacs.html> - Adaptada



b) Circuito de filtro de linha convencional
Fonte: <https://overbr.com.br/reviews/review-clamper-computer-protector-e-filtro-de-linha/2>

Se em uma análise qualitativa, conceitos e argumentos da teoria de eletromagnetismo são utilizados para explicar as causas da inércia de corrente em um indutor, em uma análise quantitativa, ferramentas matemáticas podem ser empregadas

para que as grandezas inerentes ao circuito sejam determinadas, e dessa forma possibilitar a modelagem de circuitos desta natureza.

2.1 Análise abordando os campos elétrico e magnético: Conteúdo de Eletricidade e Magnetismo

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

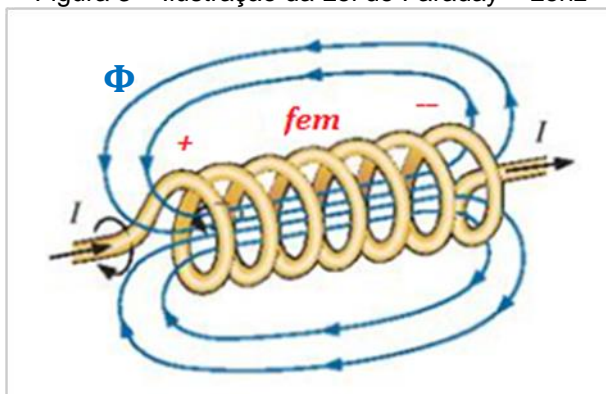
$$\phi = \int B \cdot dS \text{ [Wb]} \quad (1)$$

Sabendo, ainda, que, pela lei de Faraday-Lenz, o estabelecimento de uma força eletromotriz fem entre os terminais de indutor de um dado circuito é bastante que haja um caminho fechado qualquer enlaçado por um fluxo magnético Φ variante no tempo t , temos então a “Equação (2)”:

$$fem = -N \frac{d\Phi}{dt} \text{ [V]} \quad (2)$$

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 enquanto N indica a quantidade de espiras de uma dada bobina conforme visto na “Figura 3”.

Figura 3 – Ilustração da Lei de Faraday – Lenz



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

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:

$$fem = \oint E \cdot dL \quad (3)$$

Onde E representa o campo elétrico induzido pela variação de fluxo magnético e dL um elemento infinitesimal de comprimento.

Substituindo a “Equação (1)” na “Equação (2)”, considerando a “Equação (3)”, escreveremos a tensão induzida nos terminais do indutor da seguinte forma:

$$fem = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \frac{d}{dt} \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

Vale ressaltar que, o sentido do elemento diferencial de comprimento $d\mathbf{L}$ deve sempre concordar com o sentido de $d\mathbf{S}$ de acordo com a “regra da mão direita”.

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 equação de Maxwell:

$$fem = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

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 terminais do indutor no circuito experimental, escrevemos a “Equação (6)” onde I representa a corrente indutiva que percorre o circuito e N o número de espiras do indutor:

$$L = \frac{N\phi}{I} [H] \quad (6)$$

Quando as condições descritas pelas equações são satisfeitas, verifica-se o surgimento de uma força eletromotriz nos terminais dos indutores do circuito. A essa tensão induzida nos indutores atribui-se a característica de atrasar a corrente que os percorre. Se tais elementos são ligados em série com uma lâmpada, esse fenômeno pode se tornar visível a olho nu, o que auxilia na sua assimilação.

2.2 Análise abordando tensão e corrente: conteúdo de Circuitos Elétricos I

Partindo da “Equação (6)” escrita, considerando fluxo e corrente variáveis, obtém-se a “Equação (7)”. Onde $d\Phi$ expressa a variação do fluxo concatenado e di_L trata-se da variação de corrente no indutor.

$$L = N \frac{d\Phi}{di_L} [H] \quad (7)$$

Multiplicando e dividindo a “Equação (2)” por di_L :

$$fem = -N \frac{d\phi}{dt} = - \left(N \frac{d\Phi}{di_L} \right) \left(\frac{di_L}{dt} \right)$$

E substituindo a “Equação (7)”, obtém-se a expressão algébrica que relaciona a tensão induzida nos terminais do indutor em termos da indutância e da variação de corrente sob um dado tempo “Equação (8)”.

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} [V] \quad (8)$$

Esta equação expressa que quanto maior a indutância e/ou maior a variação da corrente através de uma bobina, maior será a tensão induzida entre seus terminais. Isso leva a uma importante conclusão: se uma corrente que percorre uma bobina deixa de variar com o tempo, a tensão induzida será nula. O que é representado pela “Equação (9)”.

$$v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = L(0) = 0 [V] \quad (9)$$

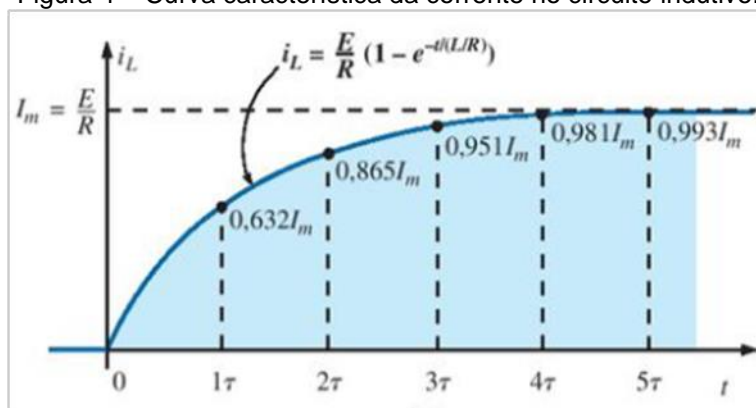
Ao se analisar as formas de onda, bem como as curvas dos parâmetros do indutor “Figura 4”, verifica-se que a formulação matemática retorna algo semelhante a “Equação (10)”.

$$i_L(t) = \frac{E}{R} (1 - e^{-t/\tau}) [A] \quad (10)$$

Onde $i_L(t)$ representa a corrente no indutor, E representa a tensão aplicada e R é a resistência do circuito. Vale ressaltar que a constante de tempo τ é obtida através da “Equação (11)” e é expressa em segundos.

$$\tau = \frac{L}{R} \equiv \left[\frac{V \cdot s}{A} \right] \cdot \left[\frac{A}{V} \right] = [s] \quad (11)$$

Figura 4 – Curva característica da corrente no circuito indutivo.



Corrente no indutor em função do tempo.

Fonte: BOYLESTAD, R. L. Introdução à análise de circuitos. 13. ed. São Paulo: Pearson, 2018. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 15 maio 2024.

3 MATERIAIS UTILIZADOS.

O circuito 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 atraso da corrente durante a manobra de fechamento de uma chave seccionadora. Os componentes deste conjunto são:

- 2 núcleos de ferro (tipo U);
- 2 núcleos de ferro (tipo I);
- 1 bobina 600/600 espiras;
- 1 bobina 300 espiras;
- 2 bobinas 1200/1200 espiras;
- 3 reatores para lâmpada de descarga;
- 2 lâmpadas incandescentes 6V; 0,5A;
- 2 suportes para lâmpadas
- 3 resistores de 100 Ω
- 1 resistor de 12 Ω

Para montagem completa das experiências também foram utilizadas fonte de corrente contínua (CC) e cabos com pinos do tipo “banana”.

4 METODOLOGIA

Participaram da experiência, os discentes devidamente matriculados na disciplina prática de Eletricidade e Magnetismo e Circuitos Elétricos I. Os alunos de Eletricidade, foram divididos em duas turmas de aproximadamente 15 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 monitor/professor pode iniciar a demonstração da energização do circuito indutivo 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.

Os alunos de Circuitos Elétricos I também foram organizados em duas turmas de aproximadamente 12 alunos cada. Para cada uma dessas turmas, professor/monitor reapresentaram o experimento, desta vez com argumentos referentes à disciplina de Circuitos Elétricos I, aos alunos que puderam acompanhar a aula e corroborar as conclusões relacionadas à disciplina em questão nas simulações computacionais e modelagem do circuito apresentado.

Como forma de avaliar o sucesso dos estudantes após a realização do experimento, foram observados o aproveitamento dos alunos em ambas as disciplinas e o relato de alguns estudantes. Nesse sentido, verificou-se que, dentre os presentes nas aulas práticas nas duas disciplinas de forma subsequente, todos obtiveram bom aproveitamento e relataram como foi elucidador ter contato com o mesmo assunto em níveis de maturidade e abordagens diferentes. 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 dessa bancada colaborou para a formação acadêmica tanto dos alunos quanto dos monitores envolvidos no projeto.

5 DESENVOLVIMENTO

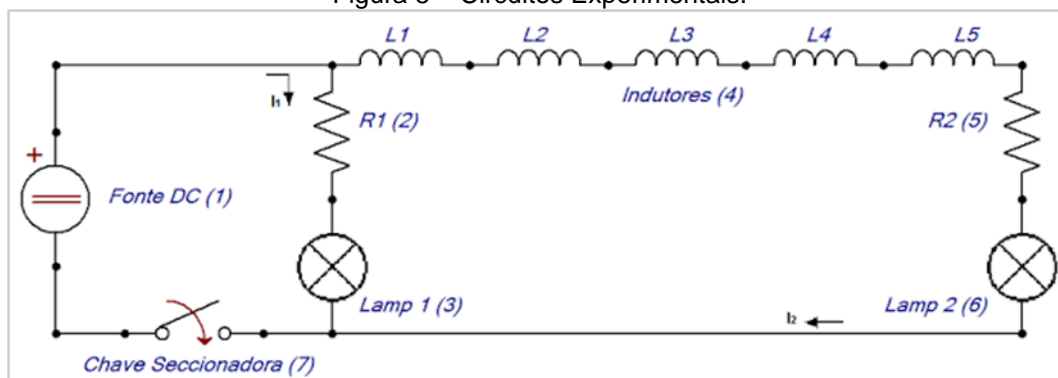
O objetivo principal das aulas de laboratório é fazer com que o discente desenvolva a capacidade de analisar a aplicação do conteúdo estudado em sala. Esse tipo de abordagem mais prática e observativa se faz necessário pois o conteúdo teórico da disciplina exige que o aluno esteja familiarizado e consiga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

5.1 Acionamento de circuito com corrente indutiva para visualização da inércia de corrente em indutor

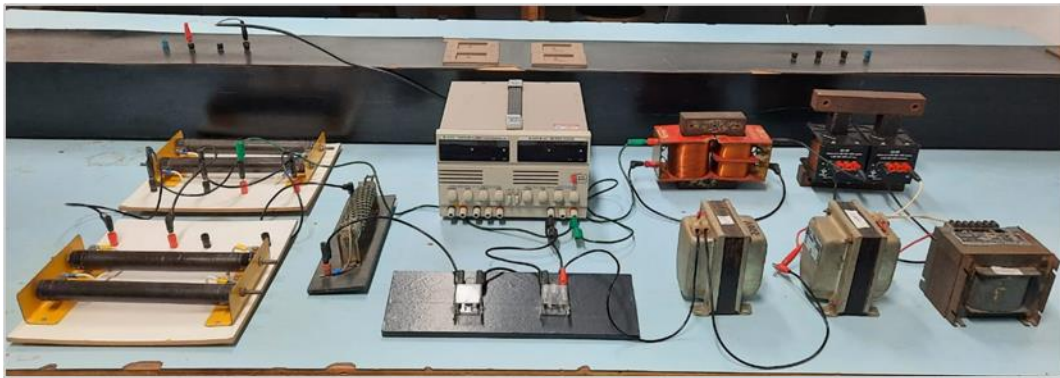
Para a realização desta etapa do experimento, o circuito montado “Figura 5a” e “Figura 5b” fez-se valer de uma fonte CC “(1)” ajustada em 20 V que alimentou dois ramos ligados em paralelo. O primeiro dos ramos conectado à fonte compreendeu um arranjo de resistores “(2)” montados em série com uma das lâmpadas. Esse arranjo foi equivalente à resistência intrínseca “(5)” do conjunto de indutores “(4)” e foi obtido através da conexão de 3 resistores de $100\ \Omega$ em paralelo ligados ao resistor de $12\ \Omega$ em série. O segundo ramo conectado à fonte, representou o ramo indutivo onde, 5 indutores são conectados em série à uma lâmpada “(6)” idêntica àquela do primeiro ramo.

Para esta experiência, tanto as resistências quanto os indutores foram concebidos a partir do reaproveitamento de sucatas e de outros materiais previamente disponíveis no acervo do laboratório. O conjunto de indutores foi montado a partir de três reatores de lâmpadas de descarga conectados em série com mais dois indutores a partir de núcleos de ferro e de bobinas com número de espiras variáveis. Os resistores, por sua vez, foram reaproveitados de outros experimentos dados em laboratório, não se fazendo necessário, portanto, a aquisição de qualquer material para o desenvolvimento de uma experiência que permitiu aos alunos melhor observação dos fenômenos eletromagnéticos abordados na parte teórica da disciplina.

Figura 5 – Circuitos Experimentais.



a) Diagrama esquemático do circuito com 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 energizado “Figura 6a”. A manobra de fechamento do circuito se deu pelo interruptor da fonte CC, aqui representado pela chave seccionadora “(7)”. No momento em que o interruptor foi fechado “Figura 6b”, verificou-se o acendimento imediato da lâmpada ligada ao ramo puramente resistivo “(3)” enquanto a segunda lâmpada “(5)”, levou algumas frações de segundos para atingir seu brilho total e se igualar à primeira “Figura 6c”. Como o arranjo do experimento constitui um divisor de corrente equilibrado, é possível comparar o estado de cada uma das lâmpadas sem o auxílio de outros instrumentos.

Figura 6 – Estado das lâmpadas.



a) Condição para chave aberta.

Fonte: o autor.



b) Instante imediatamente após o fechamento da chave.

Fonte: O autor.



c) Condição para chave há muito tempo fechada

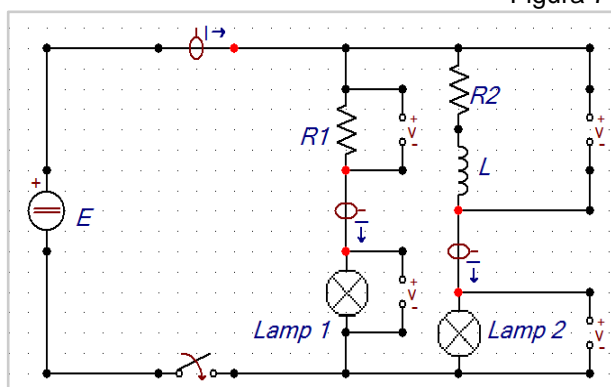
Fonte: O autor

5.2 Modelagem e determinação de parâmetros do Circuito de 1º Ordem

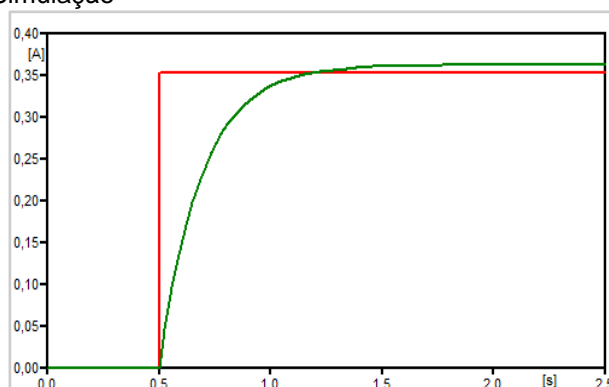
Nesta etapa foi executada uma atividade prática envolvendo a modelagem e a determinação dos parâmetros do circuito apresentado. As análises se basearam na aplicação das Leis de Kirchhoff para formular a equação diferencial característica que representa o comportamento da corrente do circuito. Após essa etapa, as análises teóricas foram complementadas utilizando o software de simulação computacional ATPDraw.

No ambiente de simulação, o circuito proposto na “Figura 7a” foi reproduzido e também foram testadas diferentes situações, arranjos e alterações dos seus parâmetros, para melhor compreensão e exploração de possibilidades. O gráfico gerado pelo ATPDraw “Figura 7b” mostra claramente o comportamento previsto pela solução analítica. Além disso, foi possível comparar os resultados das simulações com os experimentos em laboratório, validando, assim, os resultados obtidos.

Figura 7 - Simulação



(a) Circuito Simulado.
Fonte: o autor.



b) Curva Corrente X Tempo. Destaque para o comportamento da corrente nos dois ramos do circuito.
Fonte: O autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bancada didática concebido pelos programas de monitoria das disciplinas de Eletricidade e Magnetismo e Circuitos Elétricos I do curso de Engenharia Elétrica da UFMT apresentada neste artigo mostrou-se simples e eficaz no processo ensino/aprendizagem no que tange às questões da Lei de Faraday às vistas do processo de fechamento de circuito com corrente indutiva e do estudo dos parâmetros de circuitos de primeira ordem em regime permanente e transitório. Os alunos das disciplinas demonstraram forte interesse pelo assunto justamente por terem tido a oportunidade de visualizar os efeitos da inércia de corrente sob duas óticas diferentes, uma quantitativa e outra qualitativa. Ademais, ao trabalharem com esses materiais, 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.

A atividade realizada proporcionou aos alunos uma experiência abrangente que integrou teoria, simulação e prática e, principalmente, envolveu duas disciplinas subsequentes. Foram exploradas habilidades importantes na modelagem e análise de circuitos de 1ª ordem, enfatizando a importância dos parâmetros do circuito no uso de ferramentas de simulação para verificar e validar conceitos teóricos. Esta abordagem prática e interativa consolidou o aprendizado e preparou os alunos para desafios mais complexos em futuros estudos de engenharia elétrica.

Por fim, o desenvolvimento desta estratégia proporcionou a motivação dos próprios monitores uma vez que ficou nítida sua contribuição no processo ensino de Engenharia Elétrica na UFMT complementando os momentos de atendimento ao aluno.

REFERÊNCIAS

ALVES, Luiz; MARQUES, Luan B; MARTINS, Walkyria. Abertura e Extinção de Arco Voltaico como Ferramenta de Aprendizado no Curso de Engenharia Elétrica da UFMT: Um Trabalho de Monitoria. In LI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2023, Rio de Janeiro. Anais Eletrônicos. Associação Brasileira de Educação em Engenharia ABENGE, 2023. Disponível em: http://www.abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=23&c=4570 Acesso em: 05 mai. 2024.

ANIMAE, Projeto de Extensão UFMT. Circuitos Elétricos, Indutores. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=o32Ysjg8nPE> Acesso em: 05 mai. 2024.

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

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

MARTINS, Walkyria K. A. G. Roteiro de Laboratório Nº 10: Campo Variante no Tempo - Lei de Faraday - Energização do Indutor. UFMT, 2023.

INDUCTIVE CURRENT CIRCUIT ENERGIZATION AS A LEARNING TOOL IN THE ELECTRICAL ENGINEERING COURSE AT UFMT: A MONITORING WORK

Abstract: *The scope of this work is the presentation and analysis of a project developed in the 2023 Monitoring Program in the subjects of Electricity and Magnetism and Electrical Circuits I, offered by the Electrical Engineering department of UFMT (Federal University of Mato Grosso). Following the implementation of the new Pedagogical Course Project, these subjects began to have exclusively practical hours in a laboratory environment, which added greater emphasis to experimental activities. With content that requires the student to have good knowledge in Vector Analysis, Integral Calculus and Differential Equations, the task of assimilating physical phenomena that are difficult to visualize becomes even more complicated. This means that most students find it difficult to abstract the content taught in both curricular components. In this sense, there has been an effort on the part of the monitors and responsible professor to develop resources to be used in laboratory classes with the aim of approaching the subjects covered from a less abstract point of view, thus allowing an observational analysis by the students. With this, a didactic set was designed to set up experiments, to be carried out in a laboratory environment, which range from observing the process of energizing a circuit with inductive current to analyzing the interaction between elements of the electrical circuit. The prepared didactic set allows the experiment to be set up step by step and also changes in the configuration and arrangement of each element, opening space for discussions and analysis of the results of each change in the set up.*

Keywords: *Monitorship Working, Inductive Current, Teaching/Learning.*