

Motor elétrico – SimuFísica[®]: um aplicativo para o ensino de eletromagnetismo

Electric Motor – SimuFísica[®]: an application for teaching electromagnetism

Marco P. M. de Souza^{*1}, Sidnei P. Oliveira^{1,2}, Valdenice L. Luiz¹

¹Universidade Federal de Rondônia, Departamento de Física, Ji-Paraná, RO, Brasil.

²Secretaria de Estado da Educação (SEDUC), Porto Velho, RO, Brasil.

Recebido em 09 agosto de 2023. Revisado em 19 dezembro de 2023. Aceito em 21 dezembro de 2023.

Apresentamos neste trabalho o simulador Motor elétrico, um aplicativo da plataforma SimuFísica[®] voltado para uso em sala de aula. Descrevemos brevemente as tecnologias por trás do aplicativo, as equações que regem o seu funcionamento, alguns estudos mostrando a dinâmica do motor elétrico e, por fim, o uso do aplicativo nos ensinamentos Médio e Superior.

Palavras-chave: Motor elétrico, Simulação computacional, Aplicativo, Simulador, Eletromagnetismo.

In this work, we introduce the Electric Motor simulator, an application from the SimuFísica[®] platform designed for classroom use. We briefly describe the technologies behind the application, the equations governing its operation, some studies showing the dynamics of the electric motor, and finally, the use of the application in Secondary and Higher Education.

Keywords: Electric motor, Computer simulation, Application, Simulator, Electromagnetism.

1. Introdução

A temática do motor elétrico pode ser um ponto de partida eficaz para ensinar eletromagnetismo devido aos vários tópicos desse assunto relacionados ao seu funcionamento. Como o motor elétrico envolve os princípios do eletromagnetismo, os alunos podem ver diretamente como as leis dessa teoria são aplicadas em um dispositivo presente no nosso cotidiano, tornando o assunto mais relevante. O estudo do motor elétrico requer a compreensão e a integração de vários conceitos de eletromagnetismo, como corrente elétrica, campo magnético, fluxo magnético, força magnética e lei de Faraday, e também da mecânica, como torque, momento de inércia e aceleração angular.

Experimentos envolvendo a aplicação do motor elétrico no ensino de Física tem sido um tema recorrente na literatura, aparecendo em vários artigos [1–6] e dissertações [7, 8]. Há também estudos relacionados à solução numérica da dinâmica do motor elétrico [9, 10]. Por outro lado, simulações computacionais de um motor elétrico com fins didáticos são bastante escassas. Isso nos motivou a desenvolver e apresentar o aplicativo Motor elétrico, disponível na plataforma SimuFísica¹ e voltado para uso em ensino de nível médio e superior, que abordamos nas próximas seções.

O aplicativo Motor elétrico apresentado aqui oferece ao usuário uma simulação, diferenciando-se significativamente de vídeos e animações. Como um objeto de aprendizagem [11], sua principal vantagem em relação aos vídeos disponíveis na internet sobre motores elétricos é a presença do fator interatividade, onde o usuário pode configurar parâmetros e condições iniciais, conforme abordado na Seção 3. Com respeito às animações encontradas na web [12, 13], mesmo aquelas que dizem ser simulações e que têm um certo grau de interação com o usuário são bastante limitadas, já que dificilmente serão capazes de representar todos os fenômenos físicos que a solução em tempo real das equações diferenciais consegue ilustrar, como o efeito da lei de Faraday na corrente da bobina, por exemplo.

2. A Plataforma SimuFísica[®]

O SimuFísica[®] é uma coleção de aplicativos simuladores voltados para o ensino de Física em nível médio e superior. Com sua natureza multilíngua e multiplataforma, o SimuFísica[®] possui simulações que abrangem assuntos como o consumo de energia elétrica, o gás ideal e a propagação da função de onda da mecânica quântica, por exemplo. Esses simuladores podem ser acessados online ou instalados em computadores, tablets e smartphones de diversos sistemas operacionais. O acesso à plataforma SimuFísica, software gratuito e livre de propagandas, pode ser feito tanto através da web, pelo endereço <https://simufisica.com/>, como por meio do download nas lojas

*Endereço de correspondência: marcopolo@unir.br

¹ <https://simufisica.com/>

de aplicativos Google Play, App Store, Microsoft Store e Snap Store.

Tendo como público-alvo estudantes e professores, o uso do SimuFísica[®] em sala de aula, aliado a um bom planejamento, pode trazer vantagens significativas para o ensino de Física [14]. A plataforma oferece a oportunidade de visualizar fenômenos físicos de forma interativa, facilitando a compreensão de conceitos abstratos. Além disso, os alunos podem realizar experimentos virtuais, explorando diferentes parâmetros e observando as consequências rapidamente. Isso promove o aprendizado ativo, estimula o pensamento crítico e o desenvolvimento de habilidades de resolução de problemas. O *feedback* imediato proporcionado pelo SimuFísica[®] pode possibilitar aos alunos a correção de erros, aprimorando o aprendizado. A plataforma também oferece acesso flexível, sendo disponível online e na versão de aplicativo para dispositivos móveis e desktop, permitindo que alunos e professores acessem os simuladores em qualquer lugar e a qualquer momento. Ao incorporar o SimuFísica[®] aos planos de aula, os professores podem enriquecer a instrução em sala de aula, complementar a teoria com exemplos práticos e, assim, ajudar os alunos a visualizarem as aplicações da Física no mundo real.

3. O Aplicativo Motor Elétrico

Trata-se de um simulador de um motor elétrico de corrente contínua composto por uma bobina com espiras retangulares na presença de um campo magnético uniforme gerado por um par de ímãs (Fig. 1). O aplicativo é bastante interativo, permitindo ao usuário configurar diversas variáveis. Ele pode ajustar a tensão na fonte que alimenta a bobina, a intensidade e o sentido do campo magnético, o ângulo inicial que o plano das espiras faz com o campo magnético, o número de espiras, a constante de amortecimento que age na rotação da bobina, a massa da bobina, a largura das espiras e o passo de integração numérica do sistema de equações diferenciais ordinárias (EDOs) que regem a dinâmica do sistema (ver Sec. 4).

No simulador, o usuário tem a opção de visualizar algumas variáveis numericamente, como a frequência de rotação das espiras e o fluxo magnético através delas, assim como seus gráficos de evolução temporal. O aplicativo também proporciona uma representação da corrente elétrica, do vetor força magnética atuando nas espiras e das linhas de campo magnético que as atravessam.

A decisão de desenvolver um aplicativo destinado à simulação de um motor elétrico foi influenciada por diversos fatores. Além das motivações previamente apresentadas na introdução, temos o fato de que a compreensão do funcionamento dos motores elétricos é uma das habilidades da Competência Específica 1 da Base Nacional Curricular Comum (BNCC) na área de conhecimento Ciências da Natureza e suas Tecnologias

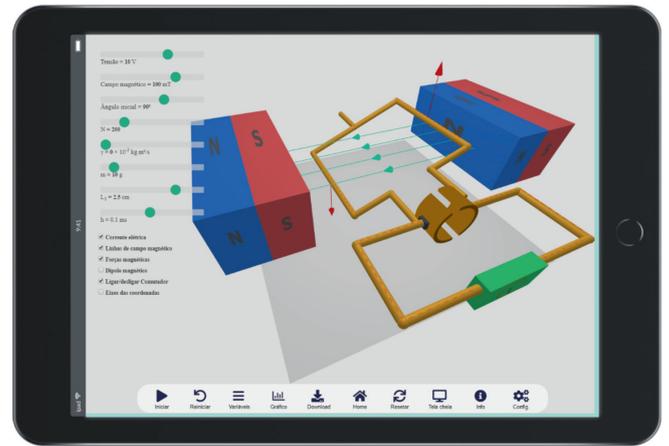


Figura 1: Versão 1.7.0 do aplicativo Motor elétrico aberto em um iPad 6. As flechas vermelhas e verdes representam, respectivamente, as forças magnéticas que agem em cada espira e as linhas de campo magnético entre os ímãs. Disponível através do link <https://simufisica.com/simulacoes/motor-eletrico/>.

no Ensino Médio [15]. Voltaremos a discutir esse ponto na Seção 5.

No que concerne aos dois tipos de motores elétricos em relação ao tipo de fonte de alimentação – corrente contínua ou corrente alternada –, optamos por simular o primeiro devido à sua simplicidade. Esses motores frequentemente operam em baixas tensões, como 3 V por exemplo, e podem ser bastante pequenos, o que facilita seu uso em sala de aula. Além disso, a construção desse tipo de motor é relativamente simples, permitindo que alunos do ensino médio e das licenciaturas o reproduzam com facilidade [7]. Por fim, vale ressaltar que o tópico relacionado à corrente contínua geralmente é introduzido aos alunos bem antes da corrente alternada, o que permite introduzir a temática do motor elétrico de corrente contínua mais cedo em sala de aula.

A versão online do *app* Motor elétrico, assim como todos os outros da plataforma SimuFísica[®], tem seu código-fonte baseado nas três das principais tecnologias da web: HTML5 (conteúdo, isto é, *tags* HTML), CSS (*layout*) e Javascript (dinâmica, basicamente). O Javascript é responsável pela solução das EDOs a partir dos parâmetros e da condição inicial definidos pelo usuário, pela renderização em tempo real da simulação na tela através da manipulação da *tag* Canvas e pela adequação do aplicativo aos dispositivos de diversos tamanhos, como desktops, tablets e smartphones. O desenho em 3D do motor elétrico é realizado através da biblioteca Three.js [16].

As versões nos idiomas inglês e espanhol são obtidas por uma tradução que é feita, principalmente, de forma automática e localmente (no computador de desenvolvimento) através do framework Node.js e da API (*application programming interface* – interface de programação de aplicações) Google translate, disponível



Figura 2: Fluxograma simplificado de desenvolvimento do app.

de forma gratuita no gerenciador de pacotes npm (*Node Package Manager*). Já as versões instaláveis obtidas via download na própria plataforma online ou nas lojas de aplicativos são desenvolvidas através das IDEs (*Integrated Development Environment* – Ambiente de Desenvolvimento Integrado) Android Studio (loja de aplicativo Play Store, do Google) e Xcode (App Store, Apple), ou com o *framework* Electron.js (Microsoft Store → Windows, e Snap Store → Linux). A Fig. 2 mostra uma ilustração simplificada das principais tecnologias envolvidas no desenvolvimento das várias versões.

4. A Simulação do Motor Elétrico

O motor elétrico idealizado no aplicativo é composto por uma bobina de massa m com N espiras retangulares de dimensões $L_1 \times L_2$, das quais $L_2 = 2,5$ cm é fixa enquanto L_1 , referente ao lado sempre perpendicular ao campo magnético, pode ser ajustada pelo usuário (ver Fig. 3). O campo magnético \vec{B} é considerado uniforme em toda a região ocupada pela bobina. Consideramos que o sistema completo do motor elétrico tem uma resistência elétrica total de $R = 10 \Omega$.

O que faz a bobina começar a girar é a ação das forças magnéticas nos lados de dimensão L_1 das espiras, que acabam gerando um torque na bobina, visto que na ausência de torque (torque resultante nulo) a bobina permanece girando, uma vez que o efeito do torque é alterar o momento angular. O módulo de cada uma das forças magnéticas totais agindo nos lados de dimensão L_1 , representadas pelas setas vermelhas no aplicativo (Fig. 1), é dado por [17]

$$F_B = iNL_1B, \tag{1}$$

onde i é a corrente na bobina.

Como estamos diante de um problema relacionado à rotação de um corpo, empregamos a segunda lei de Newton para rotações. Partindo da Eq. (1), é possível deduzir que o módulo do torque responsável pela rotação

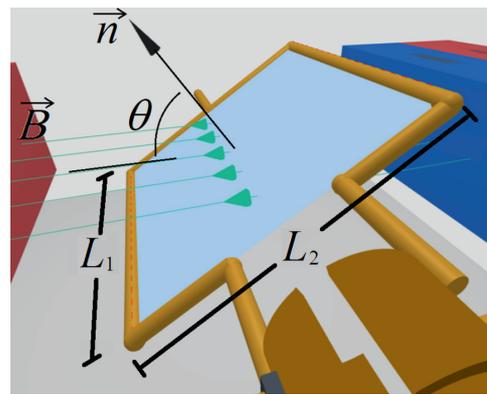


Figura 3: Algumas variáveis e parâmetros envolvidos na simulação do motor elétrico. θ é o ângulo entre o vetor normal \vec{n} ao plano da bobina e o vetor campo magnético \vec{B} .

da bobina é dado por [17]

$$\tau = iNL_1L_2B \sin \theta, \tag{2}$$

onde θ é o ângulo entre o vetor normal ao plano da bobina e o campo magnético.

O momento de inércia I de cada espira em relação ao eixo de rotação pode ser calculado a partir da sua definição na mecânica [18]:

$$I = \int \rho^2 dm, \tag{3}$$

onde ρ é a distância de cada elemento de massa dm do corpo ao eixo de rotação. O momento de inércia conjunto dos dois lados de dimensão L_1 , cada um com massa m_1 , é dado por

$$I_1 = 2 \times \frac{m_1 L_2^2}{4}, \tag{4}$$

uma vez que todos os pontos do lado L_1 estão à mesma distância $\rho = L_2/2$ ao eixo de rotação. Já o momento de inércia conjunto dos dois lados de dimensão L_2 , cada um com massa m_2 , calculado a partir da Eq. (3), é dado por [18]

$$I_2 = 2 \times \frac{m_2 L_2^2}{12}. \tag{5}$$

De posse das equações (4) e (5), chegamos no momento de inércia da bobina:

$$I_M = I_1 + I_2 = \frac{mL_2^2}{L_1 + L_2} \left(\frac{L_1}{4} + \frac{L_2}{12} \right), \tag{6}$$

onde consideramos que a bobina possui distribuição de massa uniforme e também que $m = (m_1 + m_2)$.

A corrente i que aparece no torque [Eq. (2)] não é constante, já que, com o início da rotação da bobina, temos outras duas tensões adicionais, vindas da lei de Faraday, que atuam em conjunto com a tensão da fonte

de alimentação externa V_0 : a tensão devido à variação do fluxo magnético (\mathcal{E}_1) e a tensão que vem da variação da corrente na bobina (\mathcal{E}_2). Da lei de Faraday, escrevemos \mathcal{E}_1 como [19]

$$\mathcal{E}_1 = -\frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (7)$$

onde Φ_B é o fluxo magnético através da bobina. Como estamos considerando o campo magnético uniforme dentro da bobina, escrevemos Φ_B como [19]

$$\Phi_B = -NL_1L_2B \cos \theta. \quad (8)$$

Posto isso, reescrevemos a força eletromotriz induzida [Eq. (7)] como

$$\mathcal{E}_1 = -NL_1L_2B\omega \sin \theta, \quad (9)$$

onde

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (10)$$

é a frequência angular de rotação da bobina.

Com relação ao efeito da força eletromotriz induzida pela variação da corrente, sabemos que

$$\mathcal{E}_2 = -N^2L \frac{di}{dt}, \quad (11)$$

onde L é a auto-indutância de cada espira da bobina (a indutância total é proporcional ao quadrado do número de espiras [19]). O valor da auto-indutância para espiras retangulares de dimensões $L_1 \times L_2$ compostas por fios de seção transversal circular de raio a pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[L_1 \ln \left(\frac{2L_1}{a} \right) + L_2 \ln \left(\frac{2L_2}{a} \right) - (L_1 + L_2) \left(2 - \frac{Y}{2} \right) + 2\sqrt{L_1^2 + L_2^2} - L_1 \arcsin \left(\frac{L_1}{L_2} \right) - L_2 \arcsin \left(\frac{L_2}{L_1} \right) + a \right], \quad (12)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e Y é um parâmetro que depende da forma como a corrente flui pelo fio ($Y = 0$ se a corrente flui pela superfície do fio e $Y = 1/2$ se flui de forma homogênea por toda a sua seção transversal) [21, 22].

Usando a lei das malhas [17] no circuito composto pela fonte de alimentação e pela bobina, e usando as equações (9) e (11), chegamos na seguinte EDO:

$$N^2L \frac{di}{dt} = V_0 \text{sign}(\sin \theta) - Ri - NL_1L_2B\omega \sin \theta. \quad (13)$$

O termo $\text{sign}(\sin \theta)$, onde $\text{sign}(x)$ é o sinal de um número x qualquer, aparece na Eq. (13) para levar em conta o efeito do comutador na dinâmica do motor elétrico [10], dispositivo que inverte o sentido da corrente na bobina,

fazendo o motor de corrente contínua funcionar. Isto é, sempre que $0 \leq \theta < \pi$, temos uma tensão V_0 da fonte atuando na bobina, ao passo que, se $\pi \leq \theta < 2\pi$, essa tensão vale $-V_0$, o que tende a inverter o sentido da corrente.

A relação entre a aceleração angular da bobina e o torque resultante exercido nela é dada pela segunda lei de Newton para rotações:

$$I_M \frac{d\omega}{dt} = \tau - \gamma\omega, \quad (14)$$

onde γ é uma constante de amortecimento que leva a um torque dissipativo proporcional ao valor da velocidade angular da bobina. Esse termo foi incluído para levar em conta a perda de energia cinética do motor devido ao atrito presente nas escovas e nos rolamentos, por exemplo [9].

Combinando as equações (2), (10), (13) e (14), chegamos no seguinte sistema de EDOs [9]:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (15a)$$

$$N^2L \frac{di}{dt} = V_0 \text{sign}(\sin \theta) - Ri - NL_1L_2B\omega \sin \theta \quad (15b)$$

$$I_M \frac{d\omega}{dt} = iNL_1L_2B \sin \theta - \gamma\omega. \quad (15c)$$

No *app* Motor elétrico da plataforma SimuFísica consideramos, como aproximação, que $N^2Ldi/dt = 0$. Em outras palavras, estamos desprezando o efeito da tensão induzida na bobina devido à variação da corrente nela. Observe que, para uma espira quadrada de dimensões $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$, temos que $L \sim 10^{-8} \text{ H}$ para um fio com diâmetro de 2 mm [22], que implica que o termo N^2Ldi/dt só é relevante durante o curto intervalo de tempo de atuação do comutador, que pode levar a uma variação brusca da corrente na bobina. Assim, fazendo $N^2Ldi/dt = 0$ na Eq. (15b), obtemos uma expressão para o valor da corrente em termos das outras variáveis:

$$i = \frac{V_0 \text{sign}(\sin \theta)}{R} - \frac{NL_1L_2B}{R} \omega \sin \theta \quad (16)$$

Inserindo a Eq. (16) na Eq. (15c), chegamos no seguinte sistema de EDOs:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (17a)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = a_1 |\sin \theta| - a_2 \omega \sin^2 \theta - a_3 \omega, \quad (17b)$$

onde $a_1 = NL_1L_2V_0B/(I_MR)$, $a_2 = (NL_1L_2B)^2/(I_MR)$ e $a_3 = \gamma/I_M$. No aplicativo, esse sistema de EDOs [equações (17)] é integrado numericamente pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem [23] com passo temporal h , que pode ser escolhido pelo usuário. É importante destacar que o fato de o sistema de EDOs (17) ser bem mais simples do que o sistema (15) torna possível que o simulador funcione bem mesmo em

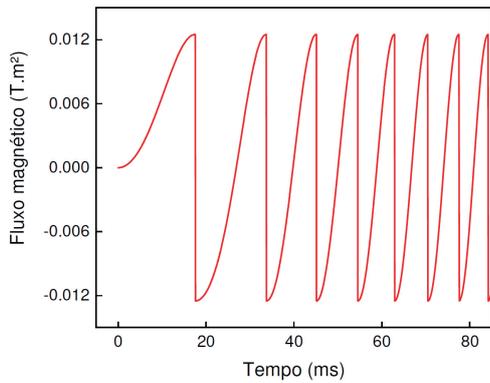


Figura 4: Fluxo magnético nas espiras.

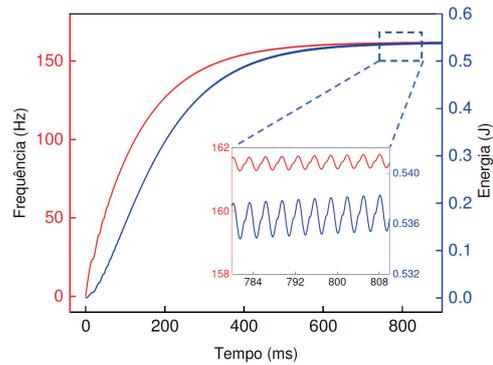


Figura 5: Frequência de rotação e energia cinética da bobina em função do tempo. *Inset:* zoom da região retangular tracejada.

computadores e outros dispositivos com processamento mais modesto.

Na Fig. 4 temos a evolução temporal do fluxo magnético total através das espiras. Consideramos uma bobina com $N = 200$ espiras, tensão da fonte de alimentação $V_0 = 10$ V, campo magnético $B = 100$ mT, ângulo inicial em relação ao sentido do campo magnético $\theta_0 = \pi/2$ rad, $L_1 = 2,5$ cm, massa total $m = 10$ g e coeficiente de amortecimento $\gamma = 0$. Utilizamos $h = 0,05$ ms como passo de integração de Runge-Kutta. Da figura podemos observar um fluxo magnético máximo com magnitude de $0,0125$ T.m². Em torno de $t = 17,5$ ms, e também em certos instantes posteriores, é observada uma alteração brusca no fluxo magnético, que vem da atuação do comutador. Esse dispositivo permite a troca do sentido da corrente nas espiras e, conseqüentemente, que o vetor dipolo magnético fique indefinidamente “tentando” alinhar-se com o campo magnético dos ímãs, efeito que gera a rotação do motor.

Podemos observar também que o período de oscilação do fluxo magnético apresentado na Fig. 4 vai diminuindo com o passar do tempo. Isso depende de vários parâmetros, como a massa da bobina, o valor do coeficiente de amortecimento e o valor do campo magnético, que resulta no crescimento da média da frequência de rotação até atingir o regime estacionário (Fig. 5). No caso onde $\gamma = 0$, a frequência de oscilação não cresce indefinidamente devido à corrente contrária induzida na bobina pela lei de Faraday.

É interessante notar a dinâmica do sistema sem a presença do comutador, já que nesse caso é possível destacar a tendência dos dipolos magnéticos em alinhar-se com os campos magnéticos. No aplicativo, pode-se realizar essa ação ao desabilitar a opção **Ligar/desligar Comutador**. Fazendo $\gamma = 5 \times 10^{-5}$ kg.m²/s, mantendo os outros parâmetros e condições iniciais indicados nas figuras anteriores e desabilitando o comutador no aplicativo, podemos observar na Fig. 6 o torque sofrido pela bobina e a tendência desta de se alinhar com o campo magnético dos ímãs. É possível observar, pela Fig. 6(b), a presença

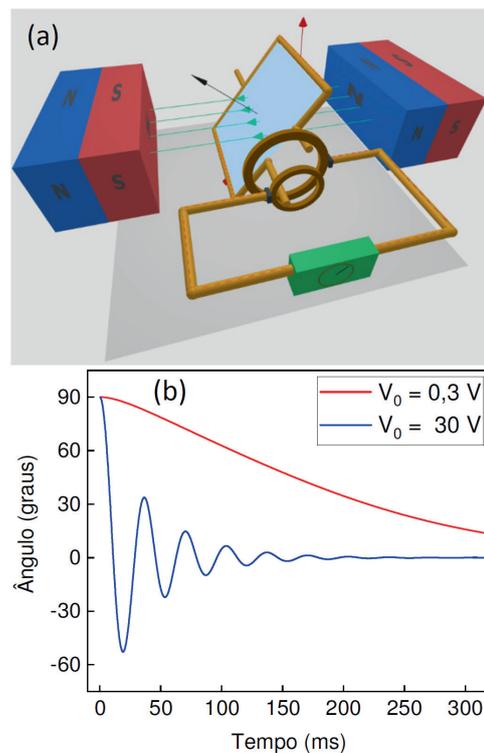


Figura 6: (a) Simulador com o comutador desabilitado. A flecha preta representa o vetor dipolo magnético de cada espira. (b) Ângulo θ da bobina em função do tempo para duas tensões da fonte de alimentação: 0,3 e 30 V.

de dois regimes conhecidos do oscilador harmônico simples [20]: amortecimento supercrítico (curva vermelha, onde a tensão da fonte de alimentação vale $V_0 = 0,3$ V) e amortecimento subcrítico (curva azul, onde temos $V_0 = 30$ V).

5. O Aplicativo Motor Elétrico no Ensino de Física

Pelo fato de o aplicativo ser compatível com dispositivos móveis, é possível facilmente projetar, sem uso

de cabos de vídeo, a simulação aberta no dispositivo em um datashow a partir do uso conjunto com uma TV box, como Apple TV (iOS e iPadOS) ou Roku Express (Android) [14], por exemplo, ou pelo próprio wifi do datashow, se disponível. Abaixo apresentamos um comentário sobre o uso do aplicativo Motor elétrico nos ensinos Médio e Superior.

Ensino Médio

O uso em salas de aula de Ensino Médio pode ser ancorado nas competências específicas da área do conhecimento Ciências da Natureza e suas Tecnologias da BNCC [15]. Dentre elas, podemos começar pela Competência Específica 1, relacionada aos fenômenos naturais e processos tecnológicos e suas relações com matéria e energia. Isso inclui, dos assuntos da Física e sempre de forma interdisciplinar, conservação de energia, consumo de energia elétrica, eficiência energética, motores elétricos, bobinas, pilhas, baterias, impactos ambientais e sustentabilidade [15].

A Competência Específica 3 é outra ligada diretamente ao uso do aplicativo Motor elétrico em sala de aula. Essa competência enfatiza as aplicações do conhecimento científico e tecnológico, bem como seus impactos na sociedade contemporânea, o que inclui aspectos éticos, morais, culturais, sociais, políticos e econômicos. A competência ressalta a interpretação, por parte dos estudantes, de informação na forma de texto, equações, gráficos e tabelas, e a análise e o funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos [15].

Todas essas competências citadas recomendam o uso de dispositivos e aplicativos digitais [15] como ferramenta de apoio no ensino. Um professor do Ensino Médio pode usar o aplicativo Motor elétrico tanto de forma isolada, com ênfase na Física por trás do funcionamento do motor elétrico e nas aplicações tecnológicas do eletromagnetismo, como de forma conjunta com outros aplicativos da plataforma SimuFísica[®], como “Conservação de energia mecânica”, “Consumo de energia elétrica” e “Espectroscopia de massa”, por exemplo.

Ensino Superior

A física do motor elétrico é explorada no famoso livro-texto “Fundamentos de Física - Volume 3 - Eletromagnetismo” [17], que consta na bibliografia básica ou complementar de disciplinas de diversos cursos superiores, como Física, Matemática, Química e várias Engenharias. Docentes desses cursos podem considerar as Competências Específicas mencionadas na subseção anterior como motivação para uma aula que envolva tópicos relacionados ao funcionamento de motores elétricos. Adicionalmente, é possível concentrar-se nos conceitos e nos cálculos envolvendo força magnética, regra da mão direita, fluxo magnético, lei de Faraday e dipolo magnético.

Além do botão **Gráfico**, que apresenta a evolução de algumas variáveis, como ângulo, corrente e fluxo magnético, pode-se fazer uso das informações que são apresentadas a partir do clique no botão **Variáveis**, o que possibilita que o discente ou professor possa comparar essas informações com resultados de cálculos relacionados à força magnética aplicada em um fio percorrido por corrente e ao fluxo magnético através de uma bobina, por exemplo, favorecendo a aprendizagem.

6. Considerações Finais

O aplicativo Motor elétrico, da plataforma SimuFísica[®], pode ser uma ferramenta valiosa no ensino de eletromagnetismo em nível de ensino médio e superior. Por ter rápida inicialização, sempre menos de três segundos em todos os dispositivos testados, e por ser compatível com os smartphones atuais, este simulador pode ser usado com bastante praticidade no ambiente acadêmico, proporcionando aulas mais interessantes.

Alguns aprimoramentos estão em desenvolvimento e serão implementados em breve no aplicativo Motor elétrico. Dentre os principais destaques, incluem-se a opção para o usuário escolher entre uma fonte de corrente contínua ou alternada para simular o motor elétrico, bem como a funcionalidade de operar o sistema de forma inversa, isto é, como um gerador de corrente devido à lei de Faraday. O aplicativo será utilizado em escolas de Ensino Médio de Ji-Paraná e nos cursos de Física do Campus de Ji-Paraná da Universidade Federal de Rondônia, de forma que correções de *bugs* e melhorias possam ser feitos após seu uso em salas de aula.

Agradecimentos

Marco P. M. de Souza agradece o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processo 304017/2022-1). Sidnei P. Oliveira agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- [1] J. Yap e D. MacIsaac, *Phys. Educ.* **41**, 427 (2006).
- [2] T.F. Schubert, F.G. Jacobitz e E.M. Kim, *IEEE Transactions on Education* **52**, 57 (2009).
- [3] M.N. Hudha *et al*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1318**, 012004 (2019).
- [4] A.M.F. Diniz e R.D. Araújo, *Rev. Bras. Ensino Fís.* **41**, e20180216 (2019).
- [5] C.F.J.S. Pires, P.C. Ferrari e J.R.O. Queiroz, *R. Bras. de Ensino de C&T* **6**, 29 (2013).
- [6] I.C.C. Monteiro, M.A.A. Monteiro, J.S.E. Germano e A. Gaspar, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 371 (2010).

- [7] J.A. Silva, *O uso do motor elétrico para o ensino do eletromagnetismo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife (2009).
- [8] G.J. Euzébio, *Motores elétricos como ideia âncora para a organização sequencial no ensino de eletricidade e magnetismo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Santa Catarina, Araranguá (2019).
- [9] J. Chiasson, *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines* (John Wiley & Sons, New York, 2005).
- [10] E.F. Moreno, Eur. J. Phys. **39**, 055203 (2018).
- [11] A.R. Arantes, M.S. Miranda e N. Studart, Física na Escola **11**, 27 (2010).
- [12] oPhysics: Interactive Physics Simulations, disponível em: <https://ophysics.com/em10.html>, acessado em: 30/11/2023.
- [13] JavaLab: Science simulations, disponível em: https://javaalab.org/en/dc_motor_en/, acessado em: 30/11/2023.
- [14] C.M. Oliveira, *Ensino da temática energia com três aplicativos da plataforma SimuFísica no Novo Ensino Médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rondônia, Ji-Paraná (2023).
- [15] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Base Nacional Comum Curricular, 19 de dezembro de 2018*, disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf.
- [16] three.js, disponível em: <https://threejs.org/>, acessado em: 09/08/2023.
- [17] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, Fundamentos de Física – Eletromagnetismo (LTC, Rio de Janeiro, 2010), v. 3, 8 ed.
- [18] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica – Mecânica* (Editora Blucher, São Paulo, 2002), v. 1, 4 ed.
- [19] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica – Eletromagnetismo* (Editora Blucher, São Paulo, 2002), v. 3, 4 ed.
- [20] H. Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica – Fluidos, Oscilações e Ondas, e Calor* (Editora Blucher, São Paulo, 2002), v. 2, 4 ed.
- [21] E.B. Rosa, Bulletin of the Bureau of Standards **4**, 301 (1907).
- [22] R. Dengler, Advanced Electromagnetics **5**, 1 (2016).
- [23] W.H. Press, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing (Cambridge University Press, New York, 2007), 3 ed.