O USO DO ARDUINO PARA O ESTUDO DE CIRCUITOS DO TIPO RC

LUCAS GOMES DE SOUZA¹, DAESUNG ROBSON SIMIONI DA COSTA²,
NADIA FERREIRA DE ANDRADE ESMERALDO¹, PAULO CÉSAR LINHARES DA SILVA²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, campus de Morada Nova

² Universidade Federal do Semi-árido - UFERSA

<lucasgsousa93@gmail.com>, <daesimioncosta@outlook.com>,
<nadiafisica@gmail.com>, <paulo258@gmail.com>

DOI: 10.21439/conexoes.v15i0.1914

Resumo. O presente trabalho visa realizar um guia prático de estudo sobre circuitos RC a partir de um protótipo baseado em Arduino. As equações de tensão, carga e corrente elétrica durante os processos de armazenamento e decaimento de energia no capacitor foram analisadas utilizando o software de simulação computacional GNU Octave® e em seguida, foram comparadas com o circuito proposto utilizando o Arduino. Como resultado, foram obtidas curvas que descrevem o comportamento das variáveis tensão, carga e corrente elétrica durante os processos de carga e descarga do capacitor analisado. Estas são as grandezas físicas de interesse no estudo de circuitos do tipo RC. Desta forma, o presente artigo descreve uma proposta didática de ensino de Física via conceitos de Programação e simulação computacional.

Palavras-chaves: Arduino. Circuito RC. Prática experimental.

THE USE OF ARDUINO FOR THE STUDY OF RC CIRCUITS

Abstract. The present paper aims to carry out a practical guide for the study of RC circuits from a prototype based on Arduino. The equations of voltage, charge and electric current during the energy storage and decay processes in the capacitor were analyzed using the computer simulation software GNU Octave® and then compared to the proposed circuit using Arduino. As a result, curves that describe the behavior of the variables voltage, charge and electric current during the charging and discharging processes of the analyzed capacitor were obtained. These are the physical quantities of interest in the study of RC-type circuits. Thus, this article describes a didactic proposal for teaching Physics via concepts of Programming and computational simulation.

Keywords: Arduino. RC circuit. Experimental practice.

1 INTRODUÇÃO

O uso crescente da tecnologia nos dias de hoje cria na nossa sociedade uma necessidade constante de adequação profissional. Nesse contexto, o profissional da Educação se destaca como peça fundamental na inserção dos seus alunos no ambiente da tecnologia. Para isso faz-se necessário novas abordagens pedagógicas inseridas dentro desse contexto.

Lançar mão de ferramentas didáticas dentro do con-

texto do ensino de Ciências, faz com que o aluno seja o centro dos processos de ensino e de aprendizagem, promovendo assim uma aprendizagem mais significativa. Inserir práticas pedagógicas a partir do método ativo possibilita a criação de situações de aprendizagem planejadas pelo professor em parceria com os alunos, em que estes são provocados e incentivados a ter uma postura ativa e crítica frente à aprendizagem (GAETA; MASETTO, 2010). Utilizar aulas práticas associadas

às aulas teóricas com o uso da ferramenta Arduino® possibilita inovação dos laboratórios didáticos, explora a interdisciplinaridade e ainda potencializa a aprendizagem dos conceitos pois torna as aulas mais atraentes e motivadoras.

Existem muitas publicações que fazem uso do Arduino® com possíveis aplicações no ensino de Física, sendo a maioria voltada para a prática experimental, bem como, a automatização dos laboratórios didáticos (MOREIRA et al., 2018). Utilizando o Arduino®, Trentin et al. (2015) realizaram a construção de um equipamento voltado para o ensino de cinemática, enquanto Guaitolini et al. (2016) realizaram estudos abordando o tema dos corpos em queda livre. Rocha e Guadagnini (2014) construíram um projeto de um sensor que permitia medir a pressão de um gás, tema útil no estudo de termodinâmica. Além disso, Rocha, Guadagnini e Lucchese (2017) descreveram a construção de um calorímetro para medidas de calor específico e Rosa et al. (2016) construíram um equipamento para o estudo da condução de calor. Também envolvendo a área da termodinâmica, Oliveira Jr, Jr e Barbosa (2016) realizaram a construção de um termostato programável. Além destes, pode-se destacar o trabalho de Kelly, Rocha e Germano (2017) que propuseram a construção de um espectrofotômetro caseiro e Silveira e Girardi (2017) que construíram um kit para o estudo do efeito fotoelétrico. Esses trabalhos, dentre outros, envolvem o uso do Arduino® como uma ferramenta útil quando aliada ao processo de ensino e aprendizagem.

A pretensão deste trabalho é trazer a possibilidade de unir um conteúdo teórico de Física, associando-o a um computador. O computador é uma ferramenta com utilização bastante disseminada nos dias atuais, sendo basicamente um conjunto de dispositivos eletrônicos que funcionam de modo harmônico para executar determinadas funções a serem dadas por quem o controla. Sua utilização se dá em todos os setores da sociedade, com grande importância e destaque para a modelagem computacional. Modelar um problema é prever situações que porventura possam ocorrer no desenvolvimento e execução de projetos. O uso de softwares de simulações numérica como o Octave® e linguagens de programação como o C/C++ associados a plataformas versáteis como o Arduino®, tornam a modelagem e simulações bastantes práticas no momento da análise de dados. O Octave® é uma linguagem computacional, desenvolvida para trabalhar na solução de problemas matemáticos e possui uma interface em linha de comando para a solução de problemas e experimentos numéricos. Faz parte do projeto GNU, sendo um software livre sob os termos da licença GPL (EATON; BA-

TEMAN; HAUBERG, 2017). Estas são ferramentas de fácil acesso e que podem ser inseridas dentro do contexto de sala de aula auxiliando na compreensão dos conceitos e dos processos associados.

No âmbito da tecnologia, se faz necessário o uso de diferentes componentes eletrônicos, os quais por sua vez são interligados entre si e constituem os circuitos elétricos. Estes componentes estão presentes em vários equipamentos utilizados no nosso cotidiano. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a montagem e a implementação de um módulo didático aplicado a práticas laboratoriais utilizando o Arduino® com base em princípios de programação em C, envolvendo os fenômenos físicos característicos de um circuito RC, que é constituído por uma fonte de alimentação, um resistor e um capacitor. Algumas quantidades físicas do circuito foram estudadas, tais como a tensão, a corrente, a carga elétrica e o tempo durante os processos de carga e descarga do capacitor. Trabalhos como o de Cavalcante, Tavoraro e Molisani (2011), estudaram o comportamento do capacitor em circuitos RC. Assim como Souza e Silva (2016), que utilizaram lâmpadas e LEDs para observar o processo de carga e descarga de um capacitor utilizando o Arduino®.

Desta forma, o trabalho aqui mostrado tem como objetivo a comparação do comportamento real dos processos de carga e descarga de um capacitor num circuito RC com o comportamento teórico descrito pelas equações físicas que descrevem os mesmos processos de carga e descarga do capacitor. Com isso, este estudo possui caráter didático destinado a práticas de ensino envolvendo o estudo de capacitores, o uso do Arduino® e conceitos de programação.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Um dos dispositivos eletrônicos presentes em inúmeros equipamentos são os capacitores. Os elementos básicos de qualquer capacitor são dois condutores isolados entre si, independentemente de suas formas, conhecidos como placas. A Física dos capacitores pode ser aplicada a outros dispositivos e outras situações que envolvem campos elétricos. O primeiro interesse no estudo de capacitores se dá pela determinação da quantidade de carga que um capacitor é capaz de armazenar. Essa quantidade é descrita por uma grandeza conhecida como capacitância (HALLIDAY; RESNICK; J., 2013).

Segundo Halliday, Resnick e J. (2013), um capacitor é um dispositivo capaz de armazenar energia em um campo elétrico. Para que um capacitor seja carregado, é preciso que um agente externo, por exemplo, uma bateria, às custas de sua reserva de energia química execute um trabalho. O trabalho executado para carregar o ca-

capacitor é convertido em energia potencial elétrica (U) no campo elétrico que se forma entre as placas deste. A energia armazenada no capacitor pode ser recuperada descarregando o capacitor através de um circuito elétrico.

A carga elétrica armazenada por um capacitor pode ser calculada pela Equação 1 e a energia pela Equação 2, sendo q a carga, U a energia, C a capacitância e V a tensão nos terminais do capacitor.

$$q = CV \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

O comportamento da tensão, da carga elétrica e da corrente no capacitor durante o processo de armazenamento de energia pode ser descrito pelas equações diferenciais obtidas num circuito como o descrito na Figura 1.

Figura 1: Circuito para armazenamento de energia em um capacitor.

Quando o circuito é submetido a uma tensão V , o capacitor C começa a ser carregado por meio de uma corrente i até receber uma carga total $q = CV$. Sendo V equivalente à (tensão no capacitor) somado à (tensão nos terminais do resistor), obtém-se, pelas leis de Kirchhoff, a Equação 3:

$$V_C + V_R = V \quad (3)$$

Substituindo $V_C = \frac{q}{C}$ e $V_R = Ri$ tem-se

$$V = \frac{q}{C} + Ri \quad (4)$$

como $i = \frac{dq}{dt}$ tem-se

$$\frac{q}{C} + \frac{dq}{dt} R = V \quad (5)$$

o que implica em

$$\frac{dq}{dt} = \frac{V}{R} - \frac{q}{RC} \quad (6)$$

Para resolver a Equação 6, pode ser utilizado o método de separação de variáveis, resultando na Equação 7:

$$\frac{dq}{VC - q} = \frac{dt}{RC} \quad (7)$$

Cuja solução analítica, obtida por meio do processo de integração é

$$q(t) = VC(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (8)$$

Sendo $i = \frac{dq}{dt}$ tem-se

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (9)$$

A tensão V_C nos terminais do capacitor é dada por

$$\begin{aligned} V_C(t) &= V - V_R = V - Ri = V - R \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \\ &= V(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \end{aligned} \quad (10)$$

Sendo assim, tem-se o conjunto de equações a seguir, que regem o processo de carga de um circuito RC.

$$V_C(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (11)$$

$$q(t) = CV(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (12)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (13)$$

De acordo com as Equações 11, 12 e 13 é constatado que o processo de armazenamento de energia no campo elétrico dos capacitores não ocorre de forma instantânea, mas varia de forma exponencial.

Segundo Halliday, Resnick e J. (2013), o produto RC que aparece nas equações tem dimensão de tempo e é chamado de constante de tempo capacitiva do circuito, sendo representado pela letra grega e definido pela Equação 14:

$$\tau = RC \quad (14)$$

De acordo com a Equação 12, no instante de tempo $\tau = RC$, a carga do capacitor inicialmente descarregado da Figura 1 aumenta de zero para 0,63 CV, ou seja, durante a primeira constante de tempo τ a carga aumenta de zero para 63% do valor final de CV. Os tempos de carga dos circuitos RC são frequentemente expressos em termos de τ ; quanto maior o valor de τ , maior o tempo necessário para carregar um capacitor.

Análogo ao processo de armazenamento de energia é possível avaliar o comportamento da tensão, da carga

elétrica e da corrente no capacitor durante o decaimento da energia. Da Figura 2 temos que a tensão de alimentação foi removida do circuito, com isso o capacitor, inicialmente carregado, começa a ser descarregado através do resistor até que a carga acumulada em seus terminais chegue a zero.

Figura 2: Circuito para decaimento de energia em um capacitor.

Sendo V_C a tensão no capacitor e V_R a tensão no resistor, pelas leis de Kirchoff, tem-se que:

$$V_C + V_R = 0 \quad (15)$$

Substituindo $V_C = \frac{q}{C}$ e $V_R = Ri$ tem-se

$$\frac{q}{C} + Ri = 0 \quad (16)$$

como $i = \frac{dq}{dt}$ tem-se

$$\frac{q}{C} + \frac{dq}{dt}R = 0 \quad (17)$$

o que implica em

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{q}{RC} \quad (18)$$

Utilizando o método separação de variáveis a Equação 18 é transformada em

$$\frac{dq}{q} = -\frac{dt}{RC} \quad (19)$$

cuja solução analítica, obtida por meio do processo de integração, é

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (20)$$

Sendo $i = \frac{dq}{dt}$ e $q_0 = V_{C0}C$ tem-se

$$i(t) = -\frac{V_{C0}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (21)$$

A tensão V_C nos terminais do capacitor é dada por

$$\begin{aligned} V_C(t) &= -V_R = -Ri = -R\left(-\frac{V_{C0}}{R} e^{-\frac{t}{RC}}\right) \\ &= V_{C0} e^{-\frac{t}{RC}} \end{aligned} \quad (22)$$

Por fim, tem-se o conjunto de equações que regem o processo de descarga de um circuito RC.

$$V_C(t) = V_{C0} e^{-t/RC} \quad (23)$$

$$q(t) = q_0 e^{-t/RC} \quad (24)$$

$$i(t) = -\frac{V_{C0}}{R} e^{-t/RC} \quad (25)$$

Assim como para o processo de carga, as equações 23, 24 e 25 mostram que o processo de decaimento de energia no campo elétrico dos capacitores não ocorre de forma instantânea, mas varia de forma exponencial.

As Equações 11, 12, 13, 23, 24 e 25 constituem o objeto de estudo quando se trata de circuitos do tipo RC. Este assunto engloba diversas áreas de estudo e muitas vezes até pelo excesso de manipulação matemática é um assunto considerado de difícil entendimento. Para transpor a dificuldade na compreensão e estabelecer o significado deste conjunto de equações se faz necessário lançar mão de experimentos práticos e didáticos que envolvam estes conceitos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho se baseia em propor meios que viabilizem a análise dos processos de carga e descarga do capacitor para a aplicação em laboratórios de ensino de universidades e escolas técnicas. Por consistirem em processos que envolvem intervalos de tempo, pensou-se em aplicar microcontroladores, através da ferramenta Arduino®, para obter leituras das variáveis durante os processos de carga e descarga dos dispositivos. Comparado com outras plataformas de desenvolvimento para microcontroladores, o Arduino® possui uma melhor relação custo/benefício. A simplicidade de manuseio do ambiente de programação, com uma linguagem facilmente assimilada por iniciantes são características que fazem do Arduino® uma plataforma muito utilizada (MCROBERTS, 2011).

A Figura 3 mostra de uma forma geral um esquema que tornaria possível a análise dos processos descritos. Os valores obtidos com o microcontrolador poderão ser utilizados para a plotagem de gráficos da tensão, da corrente e da carga elétrica durante os períodos de carga e descarga do capacitor.

Figura 3: Esquema para medição de grandezas durante a carga e descarga de capacitores.

Para análise dos capacitores montou-se um circuito RC simples composto por uma resistência e um capacitor, como o mostrado na Figura 4.

Figura 4: Esquema do circuito montado para a análise da carga e da descarga de capacitores.

O circuito foi conectado ao pino de +5,0 V e ao GND da placa do Arduino®. Para a leitura da tensão no capacitor utilizou-se da porta analógica A0.

Para analisar o processo de carga do capacitor pressiona-se o botão BC, permitindo que a tensão de +5,0 V alimente o circuito, como mostrado na Figura 1, iniciando o processo de carga. A tensão nos terminais do capacitor se eleva de zero, no instante $t = 0$, a +5,0 V no final do processo de carga, de acordo com a Equação 11. Similarmente, a carga acumulada nas placas do capacitor se eleva de zero ao valor máximo, de acordo com a Equação 12, e a corrente elétrica cai de seu valor máximo, $i = V/R$, a zero quando o capacitor for totalmente carregado em acordo com a Equação 13.

Para o processo de descarga, pressiona-se o botão BD, conectando o GND da placa do Arduino® ao terminal da resistência R, resultando num circuito como o mostrado na Figura 2. Ao pressionar o botão, a tensão no capacitor cai de seu valor inicial a zero, de acordo com a Equação 23. A carga elétrica acumulada nas placas do capacitor cai de seu valor inicial a zero de acordo com a Equação 24 e a corrente elétrica é elevada de zero ao seu valor máximo $i = V/R$, de acordo com a Equação 25.

Durante os processos de carga e descarga, o Arduino® realiza leituras de tensão nos terminais do capacitor. Os valores coletados são usados para calcular os valores correspondentes de carga e corrente elétrica.

Além disso, é realizada a cronometragem do tempo durante os processos analisados e os resultados obtidos são coletados a partir do monitor serial do Arduino®. Com os valores de leitura é possível então plotar gráficos que descrevem o comportamento dessas variáveis durante os processos.

Além do procedimento prático utilizando o Arduino®, o comportamento do circuito RC foi também analisado pelas equações características, utilizando o software de simulação numérica GNU Octave®. O software Octave® e a linguagem de programação em C foram utilizadas para a simulação dos resultados matemáticos, tanto para os cálculos quanto para a representação gráfica da solução das equações diferenciais envolvidas. A utilização desse software computacional é um recurso útil que permite avaliar e analisar com detalhes a solução das equações diferenciais que envolvem os circuitos do tipo RC.

São necessárias recomendações antes da realização da atividade, uma delas é a possibilidade de ocorrer um curto-circuito ao pressionar simultaneamente os botões B_C e B_D , de maneira que esta ação deve ser evitada no momento da realização das medidas. Uma possível solução para evitar a ocorrência desse curto-circuito seria a utilização de um interruptor do tipo alavanca de 3 posições, como o modelo 14103 da Mar-Girius Continental Indústria de Controles Elétricos LTDA. Este dispositivo seria capaz de substituir os dois botões e possibilitar apenas um estado, carga ou descarga do capacitor. Para uma atividade mais segura, seria interessante a utilização desse interruptor, pois a não utilização deste dispositivo poderia dar margem a acidentes. No entanto, sendo realizada as devidas advertências ao longo do desenvolvimento da atividade, a não utilização do interruptor não interfere na realização das medidas descritas ao longo deste trabalho.

4 EXPERIMENTO UTILIZANDO ARDUÍNO

O Arduino® é uma plataforma hardware *open-source* criada em 2005 na Itália. A ideia inicial era criar algo para facilitar o ensino e a aprendizagem nas escolas de forma prática, barata e interativa. Pouco tempo após o seu lançamento, já haviam sido vendidas milhares de placas, chegando à marca de 50.000 no ano de 2008. O Arduino® é uma ferramenta composta de hardware e software contendo suportes de INPUT/OUTPUT, um microcontrolador, pinos de alimentação, botões e outros componentes eletrônicos como resistores. Ele utiliza uma linguagem de programação bastante elementar e de fácil compreensão que tem sua origem em Wiring, sendo essencialmente C\C++.

Por ser uma plataforma livre, é possível realizar

mudanças em sua estrutura com novas possibilidades para o seu uso. Atualmente existem diversas interfaces de entrada e saída de dados, comumente chamadas de “Shields”, permitindo que módulos sejam conectados ao Arduino®, possibilitando novas funções ao sistema. Deste modo, essa plataforma mostra-se bastante versátil no ensino didático e interativo, podendo ser aplicada ao estudo de variados assuntos como Eletrônica, Programação, Física, Engenharia, dentre outros.

Neste trabalho, para realizar as simulações propostas, utilizou-se uma placa Arduino® Uno, mostrada na Figura 5.

Figura 5: Placa Arduino® Uno.

Fonte: curtocircuito.com.br, 2019.

Além da placa Arduino® Uno, montou-se um circuito utilizando-se os seguintes componentes: 5 resistores de 300Ω , 1 capacitor de $330\mu\text{F}$, 9 fios jump, 2 push-buttons e 1 protoboard. O circuito montado é mostrado na Figura 6.

Figura 6: Circuito para análise da carga e da descarga do capacitor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o Arduino® foram comparados com os cálculos feitos com o software de simulação computacional GNU Octave®. As Figuras 7 e 8 mostram os resultados de tensão, carga e módulo da corrente elétrica obtidos com o Arduino comparados com os cálculos no GNU Octave®. Analisando a comparação entre os resultados obtidos com o Arduino® e a simulação computacional com o GNU Octave®, observa-se a semelhança entre as curvas características de ambos os métodos, demonstrando assim a veracidade da teoria em relação ao comportamento real do capacitor.

Os resultados obtidos a partir da montagem e execução do módulo didático para o estudo de circuitos do tipo *RC* mostram de maneira qualitativa a concordância com os resultados esperados da literatura (HALLIDAY; RESNICK; J., 2013). As Figuras 7 e 8 mostram que as curvas relativas à simulação computacional e à simulação utilizando o Arduino® ficaram quase sobrepostas. O cálculo dos erros absoluto e relativo podem ser realizados ponto a ponto no gráfico. A cada segundo há um erro associado em cada um dos gráficos identificados nas Figuras 7 e 8. Os erros variam durante a escala do tempo, com muitos dos pontos avaliados variando de zero a 2%. Esses erros dependem de fatores como prototipação do circuito, possíveis quedas de tensão, erros inerentes aos componentes do circuito, como o capacitor e resistores, leituras e conversões entre sinais analógicos e digitais. É importante destacar ainda que a placa Arduino® Uno permite uma resolução de 10 bits o que retorna leituras entre 5 volts/ 1024 bits, ou seja, 4,9mV.

Os temas de inovação aplicados ao ensino, bem como o uso de novas abordagens e metodologias são temas recorrentes no meio educacional, no entanto, a relevância dessas metodologias só se evidencia quando relacionadas diretamente ao processo de aprendizagem e seus objetivos (GAETA; MASETTO, 2010). Observa-se a partir dos resultados expostos acima a possibilidade de se inovar no ensino para o estudo de circuitos do tipo *RC*, trazendo a prática associada à teoria de forma complementar e essencial. Além de auxiliar na compreensão a partir deste paralelo prática-teoria, com esta abordagem o aluno se insere dentro de um contexto necessário que é o uso e entendimento de novas tecnologias como a do Arduino®, tendo contato com noções básicas de programação e complementando o aprendizado dos discentes diante do conteúdo exposto.

Figura 7: Comparação entre os resultados da (a) tensão, (b) carga elétrica e (c) módulo da corrente elétrica durante o processo de armazenamento de energia no capacitor obtidos pelo Arduino® e pelo software GNU Octave®.

(a)

(b)

(c)

Figura 8: Comparação entre os resultados da (a) tensão, (b) carga elétrica e (c) módulo da corrente elétrica durante o processo de decaimento de energia no capacitor obtidos pelo Arduino® e pelo software GNU Octave®.

(a)

(b)

(c)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem descrita neste trabalho é baseada em uma abordagem didática de ensino que busca fazer um paralelo entre o conteúdo teórico sobre circuitos RC e

uma montagem experimental apoiada em ferramentas versáteis como a programação e o Arduino®. A plataforma Arduino® demonstrou possuir um grande potencial para a análise e estudo de circuitos RC .

As curvas características obtidas pelos métodos teóricos e pelo Arduino demonstraram grande semelhança, reforçando a base teórica com os resultados experimentais. Consta-se assim, que é possível unir os princípios básicos da Física com métodos computacionais de análise de forma simples e acessível, tornando o ensino da Física mais prático e dinâmico

REFERÊNCIAS

- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 4503–4503, 2011.
- EATON, W. J.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S. **GNU Octave 4.2 Reference Manual**. Boston, 2017.
- GAETA, C.; MASETTO, M. Metodologias ativas e o processo de aprendizagem na perspectiva da inovação. In: ANAIS (Ed.). **Congresso Internacional PBL**. São Paulo, 2010.
- GUAITOLINI, J.; RAMOS, G.; SILVA, S.; GAMA, A. Avaliação do módulo da aceleração da gravidade com arduino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 619–640, 2016.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; J., W. **Fundamentos de física, volume 3: eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. v. 1.
- KELLY, G.; ROCHA, D.; GERMANO, R. Espectroscopia para o ensino médio utilizando a placa arduino. **Revista Brasileira de ensino de ciência e tecnologia**, v. 10, n. 2, p. 1–17, 2017.
- MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. Fortaleza: Novatec, 2011. v. 1.
- MOREIRA, M. P. C.; ROMEU, M. C.; ALVES, F. R. V.; SILVA, F. R. O. da. Contribuições do arduino no ensino de física: uma revisão sistemática de publicações na área do ensino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 35, n. 3, p. 721–745, 2018.
- Oliveira Jr, R. L.; JR, M. A.; BARBOSA, V. H. Aquecimento e resfriamento da água, aproximados à forma real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 306–319, 2016.
- ROCHA, F.; GUADAGNINI, P. Projeto de um sensor de pressão manométrica para ensino de física em tempo real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis**, v. 31, n. 1, p. 124–148, 2014.
- ROCHA, F. S.; GUADAGNINI, P. H.; LUCCHESI, M. M. Projeto de um calorímetro de relaxação para ensino de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), v. 34, n. 1, p. 278–297, 2017.
- ROSA, C. T. W.; ROSA, Á. B. da; TRENTIN, M. A.; GIACOMELLI, A. C. Experimento de condução térmica com e sem uso de sensores e arduino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 292–305, 2016.
- SILVEIRA, S.; GIRARDI, M. Desenvolvimento de um kit experimental com arduino para o ensino de física moderna no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 39, n. 4, 2017.
- SOUZA, C. J. M.; SILVA, M. S. Estudo de circuitos rc utilizando o microcontrolador arduino. **Revista Científica Interdisciplinar**, v. 3, n. 3, 2016.
- TRENTIN, M. A. S.; ROSA, C. W. da; ROSA, Á. B. da; TEIXEIRA, A. C. Robótica educativa livre no ensino de física: da construção do robô à elaboração da proposta didática de orientação metacognitiva. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 8, n. 3, p. 274–292, 2015.

A – Linhas de comando para a programação com o Arduino®.

```
//Programa para coleta de dados durante os processos de carga e descarga do capacitor

const int capacitorPin = A0;          //Declaração de variáveis
int valorcapacitor = 0;
long previousMillis = 0;
float tensaocapacitor = 0;
float cargacapacitor = 0;
float correntecapacitor = 0;
long interval = 20000;
unsigned long time;

void setup() {
    Serial.begin(9600);}

void loop() {
    valorcapacitor = analogRead(capacitorPin);    //Atribuição do sinal analógico à variável de leitura
    tensaocapacitor = (valorcapacitor*0.0048876);    //Cálculo da tensão no capacitor
    cargacapacitor = (tensaocapacitor*330);    //Cálculo da carga elétrica no capacitor
    correntecapacitor = ((5-tensaocapacitor)/1.5);    //Cálculo da corrente elétrica no capacitor
    time=(millis());    //Definição da cronometragem de tempo em ms
    Serial.println(time);    //Impressão do tempo no monitor serial
    Serial.print(tensaocapacitor,6);    //Impressão da tensão no capacitor no monitor serial
    Serial.print("\t");
    Serial.print(cargacapacitor,6);    //Impressão da carga elétrica no capacitor no monitor serial
    Serial.print("\t");
    Serial.print(correntecapacitor,6);    //Impressão da corrente elétrica no capacitor no monitor serial
    Serial.print("\t\t");
    delay(1);    //Pausa de um ms

    if(time - previousMillis > interval) {
        previousMillis = time; }}
```

B – Linhas de comando para as simulações com o GNU Octave®.

```
//Programa para simulação da tensão no capacitor durante o processo de carga

clc
t = 0 : 0.005 : 4;    //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5;    //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330;    //Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5;    //Declaração do valor nominal da resistência, em kiloohms
v=V*(1-exp((-t/(R*C))*1000));    //Equação que descreve o comportamento da tensão
data(:,1)=t;
data(:,2)=v;
save('-ascii','Dados - PC - Tensao versus tempo.txt','data');    //Salva dados num arquivo de texto

//Programa para simulação da carga elétrica no capacitor durante o processo de carga

clc
t = 0 : 0.005 : 4;    //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5;    //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330;    //Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5;    //Declaração do valor nominal da resistência, em kiloohms
Q=C*V;    //Cálculo do valor máximo da carga elétrica
```

```

q=Q*(1-exp((-t/(R*C))*1000)); //Equação que descreve o comportamento da carga elétrica
data(:,1)=t;
data(:,2)=q;
save('-ascii','Dados - PC - Carga eletrica versus tempo.txt','data'); //Salva dados num arquivo de texto

//Programa para simulação da corrente elétrica no capacitor durante o processo de carga

clc
t = 0 : 0.005 : 4; //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5; //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330; //Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5; //Declaração do valor nominal da resistência, em kilohms
I=V/R; //Cálculo do valor máximo da corrente elétrica
i=I*(exp((-t/(R*C))*1000)); //Equação que descreve o comportamento da corrente elétrica
data(:,1)=t;
data(:,2)=i;
save('-ascii','Dados - PC - Corrente eletrica versus tempo.txt','data'); //Salva dados num arquivo de texto

//Programa para simulação da tensão no capacitor durante o processo de descarga

clc
t = 0 : 0.005 : 4; //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5; //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330; //Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5; //Declaração do valor nominal da resistência, em kilohms
v=V*(exp((-t/(R*C))*1000)); //Equação que descreve o comportamento da tensão
data(:,1)=t;
data(:,2)=v;
save('-ascii','Dados - PD - Tensao versus tempo.txt','data'); //Salva dados num arquivo de texto

//Programa para simulação da carga elétrica no capacitor durante o processo de descarga

clc
t = 0 : 0.005 : 4; //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5; //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330; // Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5; //Declaração do valor nominal da resistência, em kilohms
Q=C*V; //Cálculo do valor máximo da carga elétrica
q=Q*(exp((-t/(R*C))*1000)); //Equação que descreve o comportamento da carga elétrica
data(:,1)=t;
data(:,2)=q;
save('-ascii','Dados - PD - Carga eletrica versus tempo.txt','data'); //Salva dados num arquivo de texto

//Programa para simulação da corrente elétrica no capacitor durante o processo de descarga

clc
t = 0 : 0.005 : 4; //Declaração do intervalo de tempo para a análise
V = 5; //Declaração da tensão de alimentação, em volts
C = 330; // Declaração do valor nominal da capacitância, em microfarads
R = 1.5; //Declaração do valor nominal da resistência, em kilohms
I=(V/R); //Cálculo do valor máximo da corrente elétrica
i=I*(exp((-t/(R*C))*1000)); //Equação que descreve o comportamento da corrente elétrica
data(:,1)=t;
data(:,2)=i;
save('-ascii','Dados - PD - Corrente eletrica versus tempo.txt','data'); //Salva dados num arquivo de texto

```