

UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO PARA O ENSINO DA QUANTIZAÇÃO DA ENERGIA: DETERMINANDO A CONSTANTE DE PLANCK COM ARDUINO E LED

A LOW-COST EXPERIMENTAL APPROACH TO TEACHING ENERGY QUANTIZATION: DETERMINING THE PLANCK CONSTANT WITH ARDUINO AND LED

GASTÃO SOARES XIMENES DE OLIVEIRA*¹, RICHAR NICOLÁS DURÁN^{†1},
ROMEU MIQUEIAS SZMOSKI^{‡2}, ELOIZA APARECIDA AVILA DE MATOS^{§1},
ELANO GUSTAVO REIN^{¶2}

¹Pós-graduação em Ensino de Ciência e Tecnologia (PPGECT), Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Departamento de Física

Resumo

Este artigo tem como objetivo apresentar um método experimental para determinar a constante de Planck através do cálculo de potencial de corte V_0 provenientes de LED com diferentes comprimentos de onda. O experimento é desenhado utilizando o Arduino como ferramenta central de modo a tornar a atividade experimental mais envolvente e atrativa para os alunos, com o uso das tecnologias digitais. A partir das curvas características de cada LED, a análise gráfica foi utilizada para obter o potencial de corte e, sabendo o comprimento de onda correspondente, foi possível calcular a constante de Planck. Esta constante também foi obtida a partir do ajuste linear do gráfico do potencial de corte pela frequência de cada LED. Dada a relevância da constante de Planck na física, acredita-se que este experimento possa oferecer aos professores a oportunidade de abordar conceitos da física moderna, como a quantização da energia, de maneira mais acessível e aplicada em sala de aula. Isso não apenas enriquecerá a compreensão dos alunos sobre a natureza fundamental da matéria, mas também incentivará um engajamento mais profundo com os princípios da física quântica.

Palavras-chave: Ensino de Física, Tecnologia educacional, Física moderna, Constante de Planck, Arduino.

*gastaooliveira.1988@alunos.utfpr.edu.br

†rduran.ula@gmail.com

‡rmszmoski@utfpr.edu.br

§elomatos@utfpr.edu.br

¶elanogrein@gmail.com

Abstract

This article aims to present an experimental method to determine Planck's constant by calculating the cut-off potential V_0 from LEDs with different wavelengths. The experiment is designed using Arduino as a central tool in order to make the experimental activity more engaging and attractive for students, with the use of digital technologies. From the characteristic curves of each LED, graphical analysis was used to obtain the cut-off potential and, knowing the corresponding wavelength, it was possible to calculate Planck's constant. This constant was also obtained from the linear adjustment of the cutting potential graph by the frequency of each LED. Given the relevance of Planck's constant in physics, it is believed that this experiment can offer teachers the opportunity to approach concepts of modern physics, such as the quantization of energy, in a more accessible and applied way in the classroom. This will not only enrich students' understanding of the fundamental nature of matter, but also encourage a deeper engagement with the principles of quantum physics.

Keywords: *Physics teaching, Educational technology, Modern physics, Planck's constant, Arduino.*

I. INTRODUÇÃO

O ensino de ciências tem sido bastante flexível e mais atraente para os alunos, razão pela qual a evolução das estratégias no ensino pode ajudar os alunos a aumentar sua curiosidade sobre os fenômenos naturais que ocorrem. Essa curiosidade pode levar os alunos a entender como o universo funciona por meio de abordagens empíricas confiáveis. Esse entendimento pode ser usado para construir estratégias utilizando tecnologia que possa resolver diversos problemas enfrentados pela comunidade acadêmica.

Para Herrera (2015), a tecnologia e suas contribuições estão evoluindo e mudando os campos do conhecimento rapidamente, onde é possível avaliar que a educação, como disciplina, está assumindo novos desafios que merecem estudo mais detalhado. Neste sentido, incorporar ferramentas tecnológicas para ensinar física é um desafio real que está presente na educação atual, mas não é impossível sua implementação na sala de aula. Por isso, se pode potencializar tal processo ao recorrer da estratégia de ensino, ou seja, vincular o conteúdo da disciplina aos recursos tecnológicos e também apoiá-lo em uma ou mais teorias de aprendizagem que ajude a definir os objetivos (gerais e específicos) de maneira mais adequada.

Dentro dos conteúdos específicos, para fins deste trabalho, se traz para discussão o aspecto histórico relacionado ao surgimento dos conceitos na física moderna, relacionados com a análise teórica e prática para a determinação de constante das leis da radiação térmica, podem ser encontrados nos manuais de física das áreas científico-técnicas (EISBERG; RESNICK, 2005).

Ao modelar um corpo radiante como um conjunto de osciladores harmônicos, o físico Max Planck fez a hipótese de que os osciladores das substâncias podem ter apenas um

conjunto discreto de energia $E = nhv$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) e, no processo de interação com o campo de radiação, pode mudar sua energia em porções iguais a hv , sendo h uma constante física fundamental, que foi introduzida por ele para descrever a lei da distribuição de energia no espectro de um corpo absolutamente negro e que, mais tarde, foi denominada constante de Max Planck.

Para estudar a constante de Planck além das aulas teóricas expositivas podem ser utilizadas diversas abordagens prático-experimentais, entre elas, a demonstração prática sustentada no uso de tecnologias digitais como a apresentada nesse trabalho. O emprego de tecnologias digitais tem por objetivo fazer com que os alunos sejam sujeitos ativos no processo ensino e aprendizagem e que ocorra de forma colaborativa (MARTINS, 2016).

Dentro dessas grandes possibilidades no uso de ferramentas digitais, temos o hardware Arduino que segundo Junior, et al, (2021), afirmam que o uso do Arduino em laboratórios de física vem crescendo a cada ano, sendo uma ferramenta pequena, funcional, e com um custo razoavelmente baixo, além de ter fácil acesso nos tempos de hoje. Portanto, com relação às atividades práticas desenvolvidas em laboratório, pode-se propor algumas atividades, mesmo enfrentando a precariedade dos laboratórios e falta de materiais, como uma possibilidade experimental que auxilie o professor durante o processo de montagem, execução e finalização das atividades propostas (MARTINS, 2016).

De maneira que, o professor, ao invés de utilizar ferramentas prontas, passa-se a construir seu próprio conjunto de coleta e análise, utilizando a programação computacional como fonte principal. Assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo experimental onde podem ser coletados os dados e em condições e em condições de análises para logo serem analisados para realizar a aproximação do valor da constante de Planck.

II. APORTE TEÓRICO

II.1. A constante de Planck e sua história

A constante de Planck, normalmente simbolizada por h , é uma constante fundamental da física que mostra o fenômeno de quantização de energia que ocorre na escala microscópica e que influencia nos fenômenos observados na escala macroscópica. Essa constante é extremamente importante nas áreas de mecânica quântica, mecânica estatística, eletrônica e atualmente o quilograma padrão é definido em função do seu valor (DAMASCENO, 2019).

Desde maio de 2019 adota-se a nova definição do quilograma como "a massa do Protótipo Internacional do Quilograma" para ser definido pela configuração da constante de Planck com o valor numérico estabelecido pelo CODATA. A definição do quilograma, símbolo kg, é a unidade SI de massa. É definido pelo estabelecimento do valor numérico constante de Planck, em $6,62607015 \times 10^{-34}$, expressado na unidade J.s, igual a $\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$.

Certamente, essa situação carrega uma consequência significativa. A partir deste ponto, a incerteza associada ao protótipo Internacional do Quilograma, que anteriormente era certo, adquire um valor concreto correspondente à incerteza com a qual a constante de Planck foi determinada. Além disso, a definição do quilograma toma uma nova direção, desvinculando-se da dependência em relação ao protótipo internacional. Isso abre a possibilidade de

variações na massa do quilograma ao longo do tempo, resultando em um aumento intrínseco na incerteza associada (MEDINA; BECERRA; LUMBRERAS, 2019).

A constante surgiu como uma hipótese há pouco mais de 120 anos para explicar matematicamente o espectro de Radiação do Corpo Negro (EISBERG, 1994). Mesmo as constantes teóricas têm um valor real, então medições numéricas de h dentro do Sistema Internacional de Unidades (SI) foram rapidamente empreendidas.

A Física Quântica é a teoria física que descreve o universo atômico e das radiações, contudo, é difícil situar exatamente a respeito sobre a sua origem. Muitos historiadores da ciência afirmam que a apresentação do artigo do físico alemão Max Planck em 14 de dezembro de 1900 denominado Sobre a teoria da lei de distribuição de energia do espectro normal - entende-se espectro normal como o espectro de radiação de um corpo negro - tenha marcado o início de seu surgimento. No entanto, o nascimento da mecânica quântica ocorreu devido a inabilidade da Física Clássica em responder satisfatoriamente alguns problemas, principalmente aqueles que se apresentaram aos físicos nas últimas décadas do século XIX (ZANETIC & MOZENA, 2019; FRANCO, 2002).

Para resolver esse problema, Planck teve que assumir que a energia da radiação aprisionada na cavidade do corpo negro, para uma dada frequência, não se distribuía continuamente, como era previsto pela física clássica, mas de maneira discreta, com valores proporcionais à essa mesma frequência. Dessa hipótese surgiu a famosa relação da quantização da energia.

$$E = hf \quad (1)$$

na qual h ficou conhecida como constante de Planck, cujo valor é $6,626 \times 10^{-34}$ J·s (MOHR et al., 2012).

II.2. Os LED's com relação com a Física Quântica

LEDs (do inglês, light emitting diode ou diodo emissor de luz) são dispositivos semicondutores que emitem radiação eletromagnética (NUSSENZVEIG, 2009), desde a região ultravioleta até o infravermelho próximo, quando uma tensão é aplicada sobre os seus terminais. Devido à tecnologia utilizada no processo de fabricação, os LEDs emitem radiação em uma faixa espectral (intervalo de comprimentos de onda) cujo pico determina a frequência predominante na emissão (comprimento de onda de máxima emissão), definindo a cor do LED e cuja largura pode conter algumas dezenas de nanômetros.

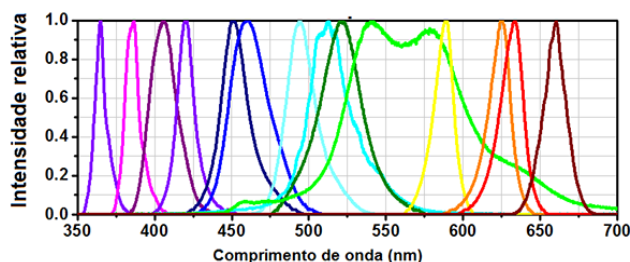


Figura 1: Comprimento de onda dos LED. Fonte: Instituto Newton C. Braga (2010).

A passagem de corrente elétrica através de uma junção p-n diretamente polarizada implica em liberação de energia devida à recombinação de elétrons em abundância na banda de condução no lado n da junção com os buracos na banda de valência no lado p da junção. Nesse processo os elétrons, ao atingirem a banda de condução no lado p, decaem para a banda de valência através da barreira de energia designada por E_g .

Nos LEDs essa energia é liberada na forma de ondas eletromagnéticas com frequências que podem estar na faixa do visível ou do infravermelho para os LEDs comumente encontrados em aplicações comerciais (como em indicadores de aparelhos eletrônicos, controles remotos, entre outros). Assumindo a ocorrência de recombinação direta dos elétrons com os buracos através da junção, com toda a energia envolvida sendo convertida em energia do fóton, então a seguinte equação é válida: $h\nu = E_g$ (RAYCHAUDHURI, 2011).

Onde h é a constante de Planck e ν a frequência da radiação emitida. A diferença de potencial V aplicada ao LED na polarização direta, aproximadamente constante, corresponde à energia (por unidade de carga) fornecida aos elétrons para vencerem a barreira de energia entre o lado n e o lado p existente inicialmente (na ausência de tensão aplicada).

II.3. Uso das tecnologias digitais educacionais.

O uso das tecnologias é um processo evolutivo que a cada dia se transforma e na atualidade não há como se pensar o nosso cotidiano sem a tecnologia, sem apoio das mídias presentes o tempo todo são tantas as formas e meios diversos que as utilizamos para comunicação, expressão, diversão, e porque não também nos estudos (KENSKI, 2008, p. 56).

Para que essas mudanças na sala de aula sejam coerentes, significativas e possam, de fato, tornar as escolas, e também as universidades, verdadeiras agências interdisciplinares para o uso consciente funcional e pedagógico das tecnologias digitais, que segundo Braga e Vóvio (2015), ponderam que o currículo e aqui acrescento, também, o projeto político-pedagógico (PPP) da escola ou da universidade não seja engessado e tradicional.

Dessa forma, as disseminações do uso das tecnologias, junto ao avanço da ciência e as transformações sociais, fazem com que o referencial sobre currículo assume novas características e se apresente com uma multiplicidade de referências e orientações teóricas e metodológicas. Surgem, assim, as propostas curriculares multi, inter e transdisciplinares, que permitem compreender e tratar o currículo contextualizado e multirreferencial, que se concretizam na prática social pedagógica e cultural ao incorporar os elementos do cotidiano trazidos pelas experiências de professores (as) e alunos (as) nas distintas redes de interação das quais participam, desenvolvem e aprendem (ALMEIDA et al., 2017, p. 393).

Nas últimas décadas, as simulações computacionais tornaram-se cada vez mais acessíveis e disponíveis para a sociedade. Atualmente, os professores de ciências podem selecionar uma ampla gama de simulações computacionais disponíveis, por exemplo, simulações de PhET Interactive Simulations, robótica com Arduino, entre outras. As simulações computacionais são projetadas com o objetivo de facilitar o ensino e a aprendizagem através da visualização e interação com modelos dinâmicos de fenômenos naturais (PERKINS, 2006; WIEMAN, 2006).

II.4. Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software. Considerando que a linguagem de programação é baseada em C++, que não é tão fácil assim, pois utiliza conceitos de orientação a objetos, fortemente tipada (todas as variáveis precisam ter um tipo). Mas é possível fazer estudos na parte de programação e assim compreender mais a lógica e programação. No hardware, há necessidades de conhecimentos básicos em circuitos elétricos, para conexão adequada dos diversos módulos, sensores e demais dispositivos que se deseja utilizar com o Arduino.

Para a construção do projeto utilizou-se o Arduino Uno que é um controlador construído com base no microcontrolador ATmega 328. A plataforma possui 14 entradas/saídas digitais (6 das quais podem ser utilizadas como PWM), 6 entradas analógicas, gerador de quartos de 16 MHz, conexão USB, conexão de alimentação, conexão ICSP e botão reset. Para o seu funcionamento é necessário fazer a conexão da plataforma ao computador através do cabo USB ou alimentá-la com a ajuda de um adaptador AC/DC ou bateria. A Fig. 3 mostra a pinagem do Arduino Uno R3 e outros detalhes de hardware da placa (NASIR, 2017).

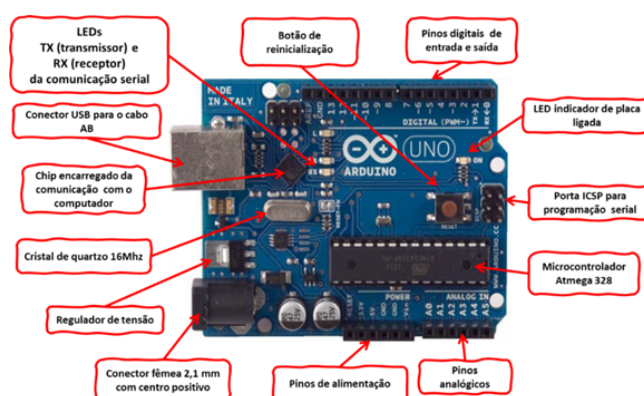


Figura 2: plataforma Arduino Uno. Fonte: Durán, R. (2021).

III. ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

III.1. Materiais

Para a realização do experimento, foi utilizado a placa Arduino UNO R3 como fonte de alimentação para os LEDs e resistores, bem como para monitorar (medir) a diferença de potencial em cada componente. Para montar o circuito, foi utilizada uma matriz de contato (protoboard) e jumpers conectores. Foram utilizados cinco LEDs (vermelho, amarelo, infravermelho, azul, verde e ultravioleta), um resistor de 100Ω e um potenciômetro linear de 1k.

III.2. Procedimento para execução da atividade experimental:

O LED, o resistor e o potenciômetro foram ligados em série, sendo o GND da placa Arduino conectado ao resistor e o pino 5V ao pino central do potenciômetro. Para medir

a diferença de potencial (ddp) no LED e no resistor, conectou-se também um jumper nas portas analógicas A1 e A3, respectivamente. Com essa conexão, exibida na Figura 3, a corrente elétrica sobre o LED e, portanto, sua luminosidade, é controlada pelo potenciômetro. O valor da corrente, neste caso, é diretamente proporcional à ddp medida no resistor fixo, pois, de acordo com a Lei de Ohm, $U = R \cdot i$. Então, a corrente elétrica pode ser determinada dividindo o valor da ddp no resistor pelo valor de sua resistência elétrica.

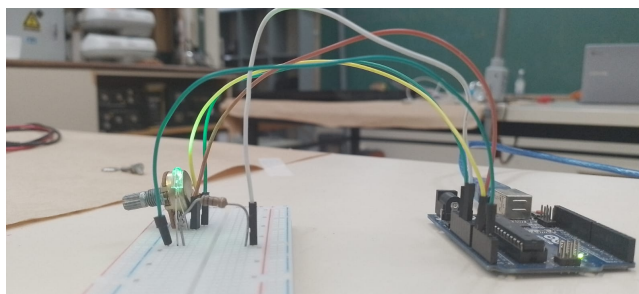


Figura 3: Montagem do circuito. Fonte: Autores (2023).

III.3. Método

O desenvolvimento desta atividade experimental foi feito pensando nas aulas de física experimental, de forma que elas possam ficar mais atrativas para os alunos, com o uso das tecnologias digitais. A construção da atividade experimental ocorreu em duas etapas. A primeira foi a elaboração do código Arduino para a leitura da diferença de potencial (ddp) no LED e no resistor, a fim de obter a curva característica do LED e seu potencial de corte. A segunda etapa foi criar um roteiro para a determinação experimental da constante de Planck a partir do potencial de corte de cada LED e de seu comprimento de onda máximo.

A curva característica do LED é obtida pelas medidas de ddp e corrente elétrica em seus terminais. Como o Arduino oferece uma ddp em relação ao GND, conectou-se o jumper da porta A3 logo após o resistor fixo e o jumper da porta A2 logo após o LED. Assim, a ddp no LED é igual à ddp medida em A2 subtraída do valor medido em A3. O código criado dentro da IDE do Arduino para o levantamento da curva de cada LED é mostrado abaixo.

A vantagem da utilização do Arduino Uno é a facilidade de tratar os dados que permitem a análises do fenômeno que está em estudo. Assim, após coletar os dados de um LED, o mesmo era substituído por outro de cor e comprimento de onda diferente e novamente o potenciômetro era girado e os valores de ddp no resistor e no LED foram gravados para posterior análise. A Figura 4 corresponde a uma captura de tela do monitor serial do Arduino enquanto estava sendo feita a coleta de dados.

Destaca-se aqui que os valores dos comprimentos de onda foram obtidos em outro experimento no qual tirava-se uma foto do LED aceso com uma rede de difração na frente, esta foto era posteriormente analisada por meio do software Tracker (BROWN, 2011). A partir dos valores do comprimento de onda foi calculada a frequência de cada LED a partir da equação

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

sendo $c = 3 \times 10^8$ m/s a velocidade da luz no vácuo.

Por último, considerando a relação de Einstein para o efeito fotoelétrico

$$eV_0 = hf + hf_0 \quad (3)$$

Onde V_0 é o potencial de corte, foi gerado o gráfico do potencial de corte em função da frequência para cada LED, a fim de determinar o valor de h . De acordo com a equação acima, a constante de Planck h corresponde ao coeficiente angular do gráfico do potencial de corte em relação à frequência. Como pode ser observado na Figura 6, o comportamento linear, previsto pela equação acima, é evidente no gráfico.

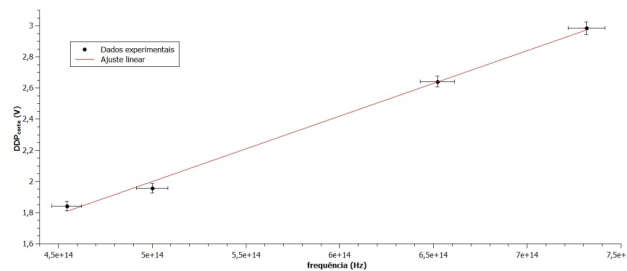


Figura 6: Curva de ajuste linear. Fonte: Autores (2023).

De acordo com a reta de ajuste encontrada no gráfico

$$h = (4,21 \pm 0,08) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (4)$$

Este valor é muito próximo do valor teórico da constante de Planck que é $4,13566743(35) \times 10^{-15}$ eV·s, resultando em um erro de aproximadamente 2

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a criação de uma abordagem experimental para a determinação da constante de Planck, com foco na utilização de LEDs de diferentes comprimentos de onda e recursos tecnológicos, como o Arduino. Através dessa abordagem, procurou-se não apenas demonstrar a aplicabilidade da proposta para a determinação da constante de Planck em uma escala acessível, mas também explorar o potencial das tecnologias digitais para enriquecer o processo de ensino e aprendizagem em Física.

Os resultados obtidos demonstram a eficácia da metodologia proposta. Variando o potenciômetro, conseguiu-se acender, apagar e controlar a luminosidade dos LEDs, evi-

denciando uma relação direta entre a corrente elétrica e a DDP no resistor. A análise da curva característica de cada LED permitiu determinar seus potenciais de corte, que foram correlacionados aos comprimentos de onda e frequências correspondentes. Notavelmente, esses valores foram consistentes com a teoria, destacando a precisão da metodologia.

A integração do Arduino e da análise gráfica se mostrou fundamental para o sucesso da abordagem. O Arduino permitiu a coleta precisa de dados, enquanto a análise gráfica facilitou a visualização dos dados, contribuindo para a compreensão dos resultados. Esse emprego eficiente de tecnologia no ensino de Física oferece uma abordagem mais atraente e interativa para os alunos, preparando-os para lidar com instrumentos tecnológicos, análise de dados e correlações teóricas.

Ao concluir esta investigação, pode-se afirmar que o experimento proposto tem grande potencial como recurso didático. Além de fornecer uma maneira tangível de se obter a constante de Planck e , conseqüentemente, discutir a quantização da energia, ele também permite que os alunos explorem a interseção entre física teórica, tecnologia e métodos experimentais. A colaboração entre essas disciplinas enriquece o aprendizado, tornando-o mais envolvente e aplicável.

Em última análise, este estudo oferece uma proposta de abordagem prática que pode ser facilmente adotada por professores de Física. Ao introduzir os alunos ao uso de tecnologias e à experimentação, essa abordagem proporciona uma base sólida para o entendimento da física moderna. À medida que a educação avança na era digital, abraçar tais abordagens inovadoras se torna essencial para nutrir o interesse e a compreensão dos alunos em campos científicos desafiadores.

REFERÊNCIAS

ANDRADES, R. N. D. Tecnologia digital educacional para a aprendizagem da dinâmica newtoniana. Orientador: Silvio Luiz Rutz da Silva. 2021. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2021.

BROWN, D. Video Analysis and Modeling Tool for Physics Education. Disponível em: < <http://www.cabrillo.edu/dbrown/tracker/> >. Acesso em: 15 Jul. 2023.

CABERO-ALMENARA, J. Las TIC y las universidades: Retos, posibilidades y preocupaciones. *Revista de la Educación Superior*, 34(135), 77-100, 2005.

DAMACENO, Luiz Paulo et al. A nova definição do quilograma em termos da constante de Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 41, 2019.

DÍAZ-BARRIGA, F. TIC en el trabajo del aula. Impacto en la planeación didáctica. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 4(10), 3-21. Doi: 10.1016/S2007-2872(13)71921-8, 2013.

EISBERG, R.; RESNICK, R. Radiação térmica e o postulado de Planck. In: Física Quântica. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2005. p. 17.

HERRERA, A. Una mirada reflexiva sobre las TIC en Educación Superior. Revista Electrónica de Investigación Educativa. 17 (1) 1-4, 2015.

KENSKI, Vani Moreira. Educação e tecnologias: O novo ritmo da informática. 3ª ed. Campinas: SP: Papirus. 139 p. 2008.

LISBOA Coutinho Júnior Antônio. Uma proposta experimental de eletricidade com o uso da placa de prototipagem Arduino para o ensino de física. 2021.

MARTINS, Marcelo. Dissertação de Mestrado com Título O uso da plataforma microcontrolada arduino no ensino de eletrodinâmica. Bagé - Rio Grande do Sul. 2016.

MEDINA, M. N.; BECERRA, L. O.; LUMBRERAS, Angel. La definición del kilogramo en el sistema revisado. Revista Española de Metrología e-media. España 2019.

MOHR, P. J.; TAYLOR, B. N.; NEWELL, D. B. CODATA Recommended values of the fundamental physical constants. Review of Modern Physics, v. 84, 2012.

MORAN, José Manuel. Ensino e Aprendizagem inovadores com as Tecnologias Audiovisuais e Telemáticas. In: MORAN, José Manuel; MASETTO, Marcos; BEHRENS, Marilda. Novas tecnologias e mediações pedagógicas. 17ª ed. Campinas: SP: Papirus. p.11-66, 2010.

NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica. 7. ed. São Paulo: Blucher. v. 3. 2009.

PERKINS, Katherine et al. PhET: Interactive simulations for teaching and learning physics. The physics teacher, v. 44, n. 1, p. 18-23, 2006.

RAYCHAUDHURI B. On the determination of the emission wavelength of an infrared LED with common laboratory instruments, European Journal of Physics, v. 32, n. 4, p. 935, 2011.

WIEMAN, Carl E. Interactive Simulations for Teaching Physics; What Works, What Doesn't, and Why. In: American Astronomical Society Meeting Abstracts. p. 249.01. 2006.