

Efeito fotoelétrico: desenvolvimento de um experimento quantitativo

Photoelectric effect: development of a quantitative experiment

Esdras Garcia Alves^{*1}, Andre Lucas Matthaeus Santos¹

¹Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Congonhas, Congonhas, MG, Brasil.

Recebido em 17 de abril de 2021. Revisado em 28 de abril de 2021. Aceito em 11 de maio de 2021.

A experimentação é um aspecto importante das atividades voltadas para o ensino e a aprendizagem da física. Embora se possa discutir sobre as formas como ela é implementada em sala de aula, não há dúvidas que os experimentos constituem objetos mediadores relevantes nestas atividades. Contudo, há muito que as instituições de ensino sofrem com a dificuldade para adquirir experimentos, seja pelo agravamento dos cortes nas verbas destinadas às escolas públicas, seja pelo alto custo dos equipamentos fornecidos pelas empresas de materiais para laboratório. Diante dessas dificuldades e com a necessidade de melhor equipar o laboratório de física de nossa instituição, que atende a um curso de Licenciatura em Física, elaboramos um projeto que tem por objetivo o desenvolvimento de experimentos, principalmente para as áreas de eletromagnetismo e física moderna. Os experimentos são elaborados de modo a permitir demonstrações quantitativas dos fenômenos físicos a um custo bem menor que o de versões semelhantes encontradas no mercado. Neste trabalho compartilhamos as informações sobre a construção de um aparato experimental destinado ao estudo quantitativo do efeito fotoelétrico e apresentamos também os resultados que podem ser obtidos com tal aparato.

Palavras-chave: Física moderna, efeito fotoelétrico, desenvolvimento de experimentos.

Experimentation is an important aspect of activities related to teaching and learning physics. Although it can be discussed how it is implemented in the classroom, there is no doubt that experiments are relevant mediating objects in such activities. However, educational institutions have long struggled with acquiring experiments, both because of the increasing cuts of funding allocated to public schools and high cost of equipment available in the market. In view of these drawbacks and considering the need to better equip the physics laboratory of our institution, which offers a Physics Degree course, we elaborated a Project to develop experiments, focusing mainly on electromagnetism and modern physics. The experiments are designed to allow quantitative demonstrations of physical phenomena at a reduced cost compared to similar versions found in the market. In this work we discuss the construction of an experimental apparatus for the quantitative study of the photoelectric effect. We also present the results that can be achieved with this apparatus.

Keywords: Modern physics, photoelectric effect, lab instrumentation.

1. Introdução

Nas duas décadas finais do século passado houve um intenso movimento em favor da inserção da física moderna no Ensino Médio. Esse movimento foi bastante positivo e podemos ter uma noção de sua repercussão pelo número expressivo de trabalhos, dedicados a esta área temática, publicados em periódicos nacionais e internacionais [1–3].

Uma parte destes trabalhos diz respeito à elaboração de materiais e experimentos que possam ser utilizados por professores como objetos mediadores em suas atividades de ensino. Em particular, diversas propostas buscam oferecer experimentos simples e de baixo custo.

A proposição de experimentos de baixo custo é uma preocupação constante na literatura, sendo verificada tanto aqui no Brasil, quanto no exterior, em diferentes

épocas [4–6], e constitui uma forma eficiente de facilitar o acesso de professores e estudantes a experimentos de física. Nos dias atuais acreditamos ser ainda mais necessário o investimento nas ações voltadas para o desenvolvimento de experimentos de custo reduzido, afinal, temos vivenciado um cenário de constantes cortes de verbas destinadas às escolas, institutos e universidades. Tais ações se justificam não apenas por tais restrições, mas também pelo alto custo dos experimentos comercializados por empresas que fornecem materiais para laboratório, principalmente aqueles destinados à física moderna, que costumam ser mais caros.

No *campus* em que trabalhamos temos vivenciado a dificuldade recorrente de adquirir equipamentos para o laboratório. Carecemos de investimentos para melhor equipar o laboratório de física de nossa instituição, particularmente nas áreas de física moderna e eletromagnetismo, mas os cortes de verbas têm sido um impedimento. Diante do insolúvel problema de

* Endereço de correspondência: esdrasgarcia10@gmail.com

equacionar essas incompatibilidades – necessidade de equipar o laboratório, alto custo dos equipamentos e cortes de verbas – elaboramos um projeto que visa o desenvolvimento de experimentos que possibilitam demonstrações quantitativas de fenômenos físicos a um custo reduzido quando comparados a versões semelhantes encontradas no mercado.

A orientação pelo desenvolvimento de experimentos quantitativos se relaciona com o fato de atendermos a um curso de Licenciatura em Física. Julgamos pertinente oferecer aos futuros professores a possibilidade de não apenas observar, qualitativamente, a ocorrência do fenômeno, mas também de demonstrar, quantitativamente, a validade dos modelos físicos que o descrevem. Isso nos coloca certa limitação quanto ao custo reduzido do equipamento, uma vez que demanda certos componentes específicos para a realização das medidas. De todo modo, como veremos, estamos conseguindo desenvolver montagens com um custo muito menor que os praticados pelas empresas do ramo de materiais para laboratório.

Neste trabalho apresentamos a montagem e os resultados obtidos com o desenvolvimento de um aparato experimental destinado ao estudo quantitativo do efeito fotoelétrico (EF). A escolha pelo desenvolvimento de um experimento para o EF se deve, como já apontamos, à demanda do laboratório de física experimental da instituição onde atuamos, bem como ao fato de que este é um tema recorrente nos trabalhos voltados para o ensino da física moderna [3].

Foge aos nossos objetivos discutir o efeito fotoelétrico em si. Textos sobre os fundamentos deste fenômeno, com descrições detalhadas das limitações enfrentadas pela física clássica para explicá-lo, juntamente com a abordagem do quantum de energia, proposta por Einstein, podem ser encontrados em livros didáticos de física para o Ensino Superior [7].

2. Experimentos Sobre o Efeito Fotoelétrico

A metodologia adotada no projeto envolve três etapas principais. Partimos de uma busca inicial por informações sobre o efeito fotoelétrico (EF), em seguida elaboramos um projeto para a construção, e por fim, executamos o projeto e realizamos as medidas. Para a realização da primeira etapa utilizamos duas fontes principais de informação: (i) uma revisão da literatura em periódicos dedicados à pesquisa e ao ensino da física; (ii) uma busca por informações técnicas nos sites dos grandes fabricantes de equipamentos para laboratório.

Iniciamos nossa revisão buscando propostas experimentais para o EF nos periódicos nacionais tradicionalmente dedicados ao ensino da física. Os trabalhos variam bastante quanto à proposta e ao aparato experimental, mas todos são destinados a demonstrações qualitativas do fenômeno. Arruda e Filho, por exemplo, apresentam

uma série de experimentos que poderiam compor um laboratório de física moderna, dentre eles, uma proposta para a reprodução do EF utilizando o bulbo de uma lâmpada comercial de mercúrio, uma placa de zinco e um eletroscópio [8]. Proposta muito semelhante é encontrada em outro trabalho, em que os autores procuram apresentar os passos para a construção de uma fonte de luz com lâmpada de mercúrio, e a demonstração do EF com eletroscópio é citada como um dos possíveis usos da fonte [9].

Adotando outro enfoque, [10] propõe a caracterização de uma célula fotoelétrica construída com uma placa de alumínio e uma tela de aço inox. Os autores deste trabalho utilizam a luz ultravioleta emitida por uma lâmpada de mercúrio e um circuito amplificador transistorizado para demonstrar a ejeção de elétrons da placa pela incidência de luz. Para demonstrar a ocorrência do efeito fotoelétrico, com uma montagem que lembra a anterior, Silveira e Girardi posicionam uma grade e uma placa metálicas em frente a diferentes fontes de luz (LEDs de diferentes cores e uma lâmpada ultravioleta de esterilizador de escova de dentes). Segundo os autores, a incidência da luz libera elétrons da placa e uma fotocorrente, amplificada pelo circuito integrado CA3420, pode ser medida entre a placa e a tela [11].

Enquanto nos trabalhos discutidos no parágrafo anterior as placas metálicas estavam imersas no ar atmosférico, o que impõe serias limitações à medição de uma fotocorrente, outros autores investiram no uso de uma pequena lâmpada neon NE2H como célula fotoelétrica para a reprodução do EF [12]. Estas lâmpadas são formadas por um pequeno bulbo de vidro, com dois eletrodos em seu interior, preenchido por uma mistura de neônio e argônio à baixa pressão. Utilizando LEDs que emitem luz de diferentes cores, os autores deste trabalho iluminaram um dos eletrodos da lâmpada e mediram a fotocorrente correspondente, que, segundo eles, chegou a 30 nA no caso do LED violeta. Nos parece estranho, neste trabalho, a medição de uma corrente tão alta para um experimento sobre o EF, usando eletrodos tão pequenos como os de uma lâmpada neon e sem a utilização de uma fonte de tensão entre os eletrodos para acelerar os elétrons.

É importante ressaltar que, mesmo fazendo uso de circuitos eletrônicos para medir a fotocorrente, os autores dos três trabalhos anteriores sugerem apenas explorações qualitativas com seus experimentos. Esta sugestão indica certa limitação nesse tipo de experimento.

Identificamos, ainda, outra vertente de trabalhos na literatura que abordam a interação da luz com a matéria com base no chamado EF interno [13]. O EF interno diz respeito à movimentação do elétron entre a banda de valência e condução de um material semicondutor e não à sua ejeção do material, como ocorre na incidência de luz em uma placa metálica. Em geral, nestes trabalhos os autores utilizam LEDs, LDRs e outros dispositivos semicondutores sensíveis à luz para exemplificar a interação

da luz com a matéria e até para determinar o valor da constante de Planck [14–16]. Não daremos maior atenção a trabalhos como estes pois fogem ao nosso foco, que está relacionado ao efeito fotoelétrico externo, em que ocorre a ejeção de elétrons do metal.

Dando seguimento à nossa busca por informações, realizamos uma pequena varredura em alguns periódicos internacionais dedicados ao ensino e à pesquisa em física. Neles também encontramos propostas qualitativas para a demonstração experimental do EF [17–19]. O primeiro utiliza uma lâmpada neon NE2H em série com um LED e uma fonte de tensão da ordem de 60 V. Ao iluminar os eletrodos da lâmpada neon com luz de frequência mais alta, o LED emite luz, indicando a passagem de corrente elétrica entre os eletrodos. Os outros dois utilizam uma lâmpada de mercúrio com fonte de luz ultravioleta e um eletroscópio que se descarrega pela incidência da luz, evidenciando a emissão de elétrons. Mas além de trabalhos de cunho qualitativo, encontramos diversos autores que sugerem abordagens experimentais quantitativas para o fenômeno.

De um modo geral, os trabalhos de cunho quantitativo apresentam certa semelhança entre si. Uma fonte de luz, que pode ser uma lâmpada de mercúrio ou uma lâmpada incandescente associada a filtros de comprimentos de onda específicos, ou então um conjunto de LEDs, é utilizada para iluminar o catodo de uma válvula fotoelétrica. Uma válvula fotoelétrica é um dispositivo formado por dois eletrodos metálicos no interior de uma campânula de vidro evacuada (Figura 1). A incidência de luz de frequência apropriada libera elétrons do catodo da válvula, que se deslocam em direção ao anodo devido a uma diferença de potencial estabelecida entre ambos por uma bateria externa. Medidas da fotocorrente e do potencial de corte para diferentes frequências são utilizadas pelos autores para determinar a constante de Planck e, em alguns casos, a função trabalho do metal do catodo.

Alguns trabalhos sugerem a utilização da válvula fotoelétrica RCA 929 para a realização de medidas do potencial de corte em função da frequência da luz [4, 20, 21]. O primeiro indica o uso de alguns galvanômetros específicos, suficientemente sensíveis, para medir o potencial de corte e assim determinar o valor da constante de Planck experimentalmente. Os dois últimos sugerem a construção de circuitos eletrônicos simples, com transistores, para amplificar a fotocorrente produzida pela incidência de luz. A partir do gráfico do potencial de corte em função da frequência da luz os autores determinam o valor da constante de Planck, com boa aproximação com o valor estabelecido.

Outros trabalhos mencionam o uso da válvula fotoelétrica RCA 1P39. Embora sejam componentes distintos, a 929 é muito semelhante à 1P39, sendo a diferença entre elas a base não higroscópica desta última, o que assegura uma resistência elétrica dez vezes maior entre seus terminais em comparação com as bases

comuns, mesmo sob condições de alta umidade [22]. A válvula 1P39 é também o componente citado no manual do aparelho destinado à determinação da razão h/e , da fabricante de equipamentos para laboratório PASCO [23].

Por suas especificidades, gostaríamos de destacar três dos trabalhos que citam o uso da válvula 1P39 em experimentos sobre o EF. Os dois primeiros sugerem circuitos eletrônicos simples, baseados em circuitos integrados, para amplificar a fotocorrente e não mencionam a determinação da função trabalho do material do catodo [5, 24]. O outro utiliza a medida da queda de tensão sobre um resistor como forma indireta de obter a fotocorrente e afirma determinar a função trabalho. Além disso, até por ser mais recente, utiliza LEDs que emitem luz de diferentes cores para iluminar o catodo e sugere um experimento, com o auxílio de um osciloscópio, para demonstrar que não existe um tempo de retardo entre a incidência de luz e a ejeção de elétrons compatível com a teoria ondulatória [25].

De acordo com certos autores, não seria possível determinar a função trabalho do catodo da válvula em um experimento como os citados nos parágrafos anteriores [26, 27]. Um potencial de contato entre os metais do anodo e do catodo estaria somado à diferença de potencial estabelecida entre esses eletrodos pela bateria externa. Desse modo, ao medir o potencial de corte, o valor estaria alterado pelo potencial de contato dos metais. O resultado é um deslocamento da reta do gráfico da corrente fotoelétrica em função da frequência da luz [28]. Embora a reta esteja deslocada e, portanto, os interceptos, sua inclinação permanece a mesma, o que torna possível sua utilização na determinação da constante de Planck [4].

Para finalizar esta revisão sobre as propostas experimentais que encontramos na literatura, gostaríamos de mencionar mais dois trabalhos por suas características particulares em relação aos demais. O primeiro utiliza um sistema de aquisição automática de dados por computador para realizar as medidas [29]. Segundo o autor, nos modos convencionais de realização das medidas o valor da constante de Planck não é determinado com muita precisão devido à existência de uma corrente reversa entre anodo/catodo, e argumenta que sua montagem seria capaz de contornar este problema. Contudo, o valor de h que ele apresenta se situa na mesma amplitude de variação dos demais trabalhos e, além disso, utiliza um sistema elaborado, com o uso do hardware e do software da empresa PASCO, o que torna a montagem mais cara.

Os outros trabalhos utilizam outros componentes fotoelétricos em suas medidas [30, 31]. O primeiro emprega uma válvula fotoelétrica RCA 925 e o segundo uma válvula fotomultiplicadora XP2008, cuja vantagem, segundo os autores, é a maior facilidade em realizar as medidas uma vez que o próprio dispositivo realiza uma amplificação da corrente produzida pela incidência da luz. Este componente, todavia, é mais difícil de

ser encontrado. Estas constituem outras opções de dispositivos fotoelétricos que podem vir a ser utilizados em experimentos destinados ao estudo quantitativo do efeito fotoelétrico.

3. Nossa Proposta Experimental

Com base nas informações que reunimos a partir de nossa revisão, ficou clara a necessidade em utilizar uma válvula fotoelétrica para um experimento quantitativo. Este componente não é mais fabricado e somente alguns comerciantes/colecionadores de válvulas eletrônicas o têm para venda. Apesar disso, não foi difícil encontrá-lo em uma busca no site Mercado Livre. Aliás, nos surpreendemos ao encontrarmos três vendedores que tinham pequenos estoques deste componente, a um preço médio de R\$ 200,00.

O aspecto físico da válvula RCA 1P39 pode ser visto na Figura 1A e sua resposta espectral para diferentes comprimentos de onda na Figura 1B. Ela possui uma base de 8 pinos, de diâmetro aproximado de 3,2 cm, e seu comprimento, incluindo a base, é de 5,8 cm. Os elementos fotossensíveis, constituído por um catodo e um anodo metálicos, se encontram no interior de uma campânula de vidro evacuada. O catodo, na forma de um semicilindro, está conectado ao pino 8 da base, e o anodo, como um arame em seu centro, está conectado ao pino 4. Quando luz de frequência apropriada incide sobre o catodo, elétrons são ejetados do metal e podem ser coletados pelo anodo, gerando uma corrente fotoelétrica.

É importante destacar que diversos autores [20, 21, 24] mencionam a necessidade de recobrir a válvula com uma pequena tira de material opaco, de modo a impedir que a luz incida diretamente sobre o anodo e produza a ejeção de elétrons deste eletrodo. Nós utilizamos uma tira de fita isolante, de 5 mm de largura, como se pode ver na Figura 2. Naturalmente, com o emprego deste recurso



Figura 2: Detalhe da tira de fita isolante colocada sobre a válvula para evitar que a luz dos LEDs atinja o anodo.

ocorre uma redução da incidência de luz sobre o catodo também, mas isso não afeta a realização das medidas.

Como fontes de luz de diferentes frequências utilizamos LEDs que emitem luz com comprimentos de onda distintos: infravermelho, vermelho, amarelo, verde, azul e violeta. Para facilitar a mudança da frequência da luz, construímos um conjunto de seis placas com LEDs que podem ser facilmente encaixadas em um conector USB fixado na base do experimento. Cada placa contém dois LEDs de alto brilho, de 5 mm de diâmetro e com encapsulamento transparente, e também um conector USB macho 90°, que permite seu encaixe na base do experimento, em frente à válvula (Figuras 2 e 3). O uso de conectores USB, que possuem quatro vias, permite que os LEDs possam ser ligados/desligados de forma independente, de modo a variar a intensidade da luz que incide no catodo da válvula.

Como a intensidade da luz emitida pelo LED (e em menor medida, o comprimento de onda da luz) depende da corrente que circula por ele, utilizamos um resistor de valor fixo e um de valor variável (trimpot multivoltas) em série com cada LED (Figura 3A). Com um miliamperímetro ligado a cada LED isoladamente, ajustamos o trimpot para que a corrente fosse de 15 mA. Em todas as placas utilizamos trimpots de 200 Ω . Como os LEDs de diferentes frequências trabalham com tensões distintas, utilizamos resistores de 220 Ω nos infravermelhos, 150 Ω nos vermelhos e amarelos, 100 Ω nos azuis e verdes, e 82 Ω nos violetas.

As placas com LEDs foram construídas com placas de fenolite para circuito impresso. Cortamos as placas nas dimensões 5 cm \times 3 cm, desenhamos as trilhas do circuito com caneta para CD (as mesmas canetas usadas para escrever em transparências para retroprojetor) no lado cobreado da placa, e depois realizamos a corrosão do cobre com percloroeto de ferro. Para quem não está habituado com este processo vários tutoriais podem ser encontrados no YouTube. O resultado é uma placa com trilhas de cobre em uma das faces, como se pode ver na Figura 3B. Furos de 1 mm de diâmetro são feitos na placa para a inserção dos terminais dos componentes.

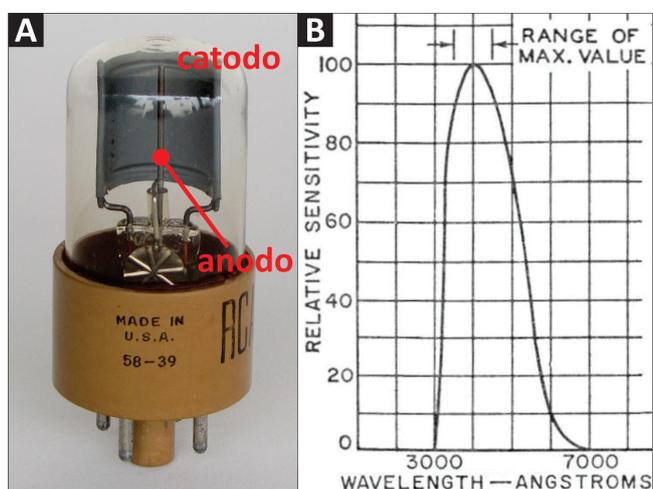


Figura 1: Em A, aspecto físico da válvula fotoelétrica RCA 1P39, e em B [32], sua resposta espectral para diferentes comprimentos de onda.

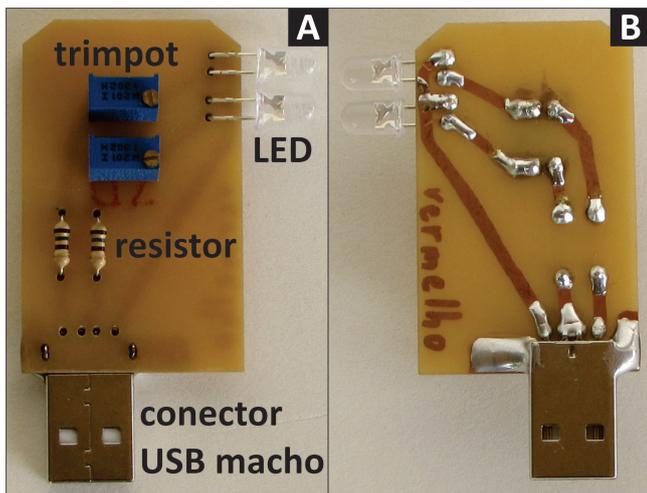


Figura 3: Detalhes da placa com LEDs. Em A, o lado dos componentes, e em B, o lado cobreado da placa, onde os terminais dos componentes são soldados.

Os terminais dos componentes eletrônicos são soldados nas trilhas de cobre. É importante ressaltar que o conector USB requer um reforço na solda, para maior robustez mecânica. Veja, na Figura 3B, que há dois reforços de solda em suas laterais, o que o deixa firmemente preso à placa. Note que os dois terminais centrais do conector USB foram ligados a uma única trilha, pois só estamos utilizando 2 LEDs e, portanto, precisamos apenas de 3 terminais (o mais à esquerda na Figura 3B para o polo negativo, os dois centrais para um dos LEDs, e o mais à direita para o outro LED).

Para determinar o comprimento de onda máximo da luz emitida por cada LED realizamos o levantamento de suas curvas espectrais utilizando o espectrofotômetro HR2000+, da empresa Ocean Optics. Embora não seja exatamente monocromático, cada LED possui um espectro de emissão bastante acentuado em torno de uma frequência específica, como podemos visualizar na Figura 4, que mostra o gráfico do LED violeta. O Quadro 1 mostra os valores do comprimento de onda máximo emitido pelos LEDs que utilizamos em nosso experimento.

A base da montagem, onde estão fixados o soquete da válvula e o conector USB fêmea, é formada por um disco de MDF de 18 mm de espessura, parafusado no interior de um tubo de PVC de 150 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento (Figura 5). Observe, na mesma figura, um sulco de 4 mm de espessura por 5 mm de profundidade no disco de MDF. Este sulco é utilizado para o encaixe de uma lata de leite em pó, completamente pintada de preto fosco em sua parte interna, que cobre todo o conjunto válvula+LEDs e impede a entrada de luz externa durante a realização das medidas. É importante observar, também, o alinhamento dos LEDs com relação ao catodo da válvula. Depois de encaixada a placa no conector USB da base, os LEDs precisam estar completamente alinhados com o catodo da válvula.

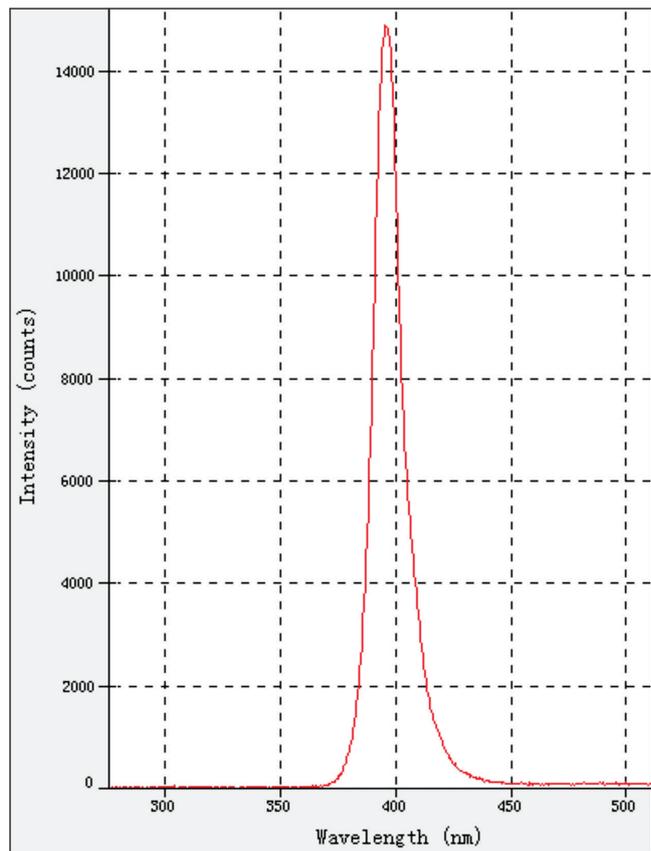


Figura 4: Gráfico do espectro de emissão do LED violeta utilizado no experimento.

Quadro 1: Comprimento de onda máximo emitido pelos LEDs.

Luz emitida	Comprimento de onda máximo (nm)
infravermelha	923,4
vermelha	632,1
amarela	591,2
verde	519,2
azul	460,8
violeta	396,3

Na lateral da base foram feitos furos para a fixação de diversos outros componentes: os bornes para a ligação do circuito ao voltímetro e ao amperímetro, as chaves alavanca de 3 terminais para ligar/desligar cada LED de forma independente, a chave alavanca de 6 terminais para conectar as baterias de 9 V aos terminais do potenciômetro, o plugue RCA onde é ligada a fonte de alimentação dos LEDs e o potenciômetro que possibilita modificar a tensão anodo/catodo.

Os componentes citados no parágrafo anterior fazem parte de dois circuitos distintos que ficam no interior da base. Um deles, dedicado à alimentação dos LEDs, pode ser visto na Figura 6.

Uma fonte de 9 VDC, reaproveitada de um aparelho de telefone, é conectada à base por meio de um plugue RCA.

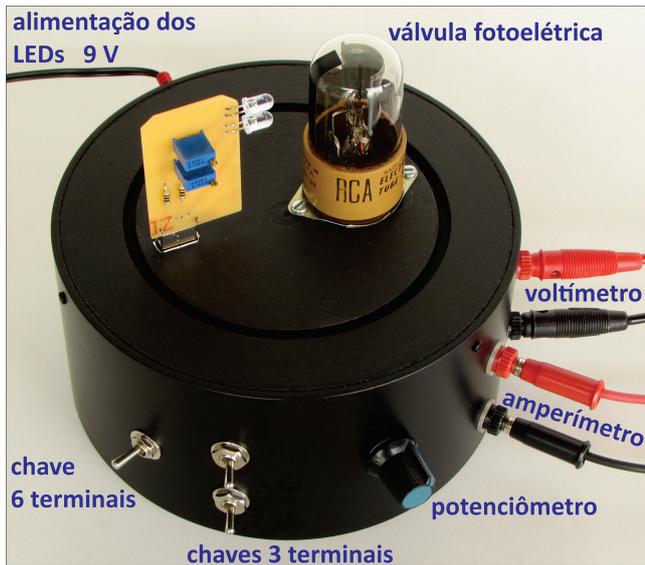


Figura 5: Aspecto geral da base do aparato experimental.

No interior da base esta fonte está ligada a um circuito regulador de tensão LM7805, que reduz a tensão para 5 V (os capacitores e resistores conectados ao LM7805 ajudam a estabilizar a tensão). A saída de 5 V está conectada a um dos contatos das duas chaves de 3 terminais (caso disponíveis, podem ser usadas chaves simples, de apenas 2 terminais). Os outros contatos das chaves e o terminal terra da fonte são conectados aos terminais do conector USB fêmea fixado na base. Como utilizamos apenas dois LEDs, um dos terminais do conector USB não seria usado e optamos por unir os dois conectores centrais, pois eles se posicionam muito próximos um ao outro. Ao acionar as chaves é possível ligar/desligar cada LED de forma independente. Os resistores formados pelo trimpot e pelo resistor fixo permitem ajustar a corrente em cada LED, de modo a garantir que ambos emitam, aproximadamente, a mesma intensidade de luz.

O segundo circuito, onde se encontra a válvula fotoelétrica, pode ser visto na Figura 7.

O terminal positivo de uma das baterias é unido ao negativo da outra, formando um terminal terra. Os outros terminais das baterias, um a +9 V em relação ao terra, e outro a -9 V, são ligados aos terminais centrais da chave alavanca. Dois dos terminais mais próximos à borda da chave são conectados aos terminais mais externos de um potenciômetro multivoltas de 10 k Ω . O terminal central do potenciômetro está ligado aos bornes de conexão do voltímetro e do amperímetro, conforme mostra o diagrama da Figura 7. Essa forma de ligação permite fazer o potencial do anodo positivo ou negativo em relação ao catodo, de modo a acelerar ou retardar os elétrons emitidos pelo catodo, ao girar o potenciômetro. Destacamos a importância de utilizar um potenciômetro multivoltas nesta aplicação para que se possa ter maior controle na variação da tensão entre

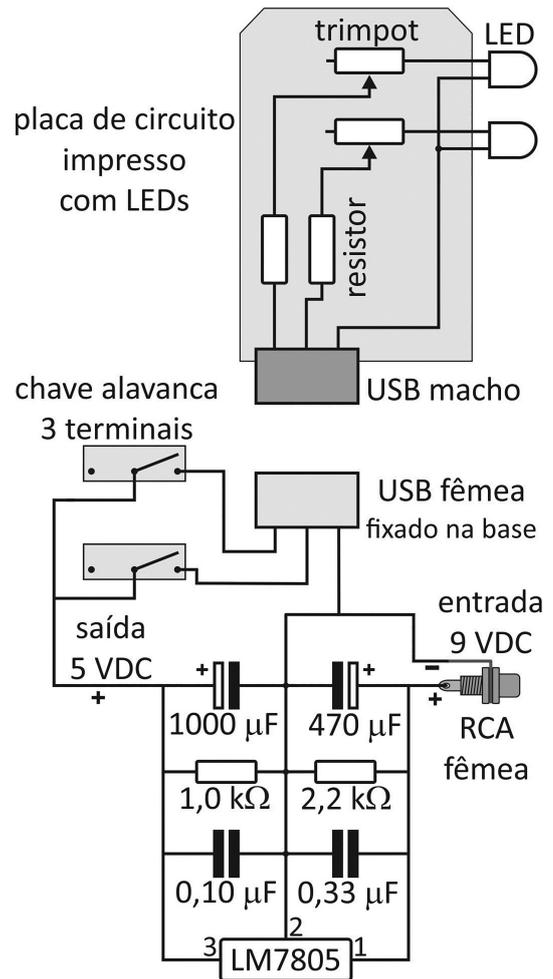


Figura 6: Diagrama esquemático do circuito de alimentação dos LEDs.

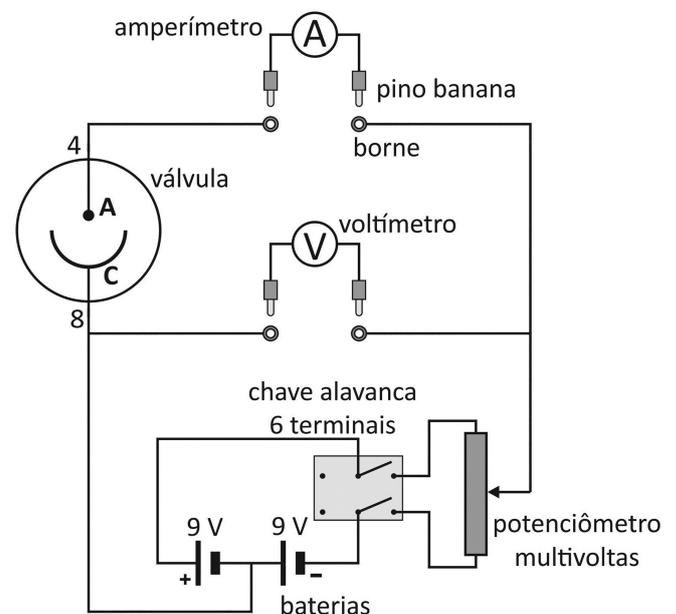


Figura 7: Diagrama esquemático do circuito da válvula fotoelétrica.

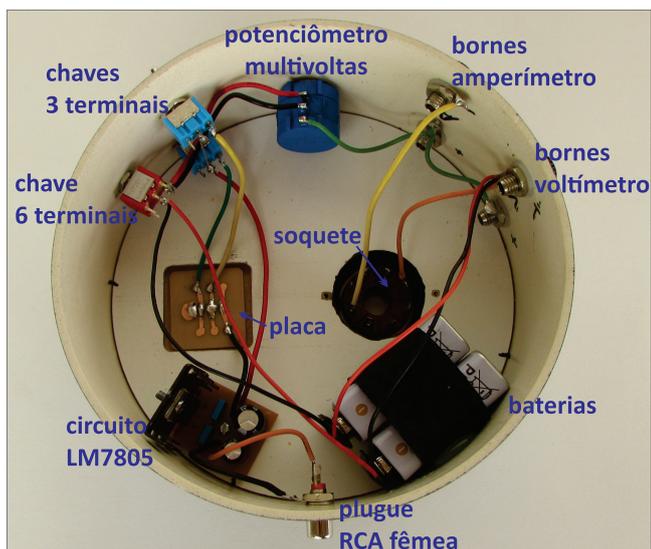


Figura 8: Disposição dos componentes no lado interno da base.

anodo/catodo. A Figura 8 mostra a disposição destes componentes eletrônicos no lado interno da base.

Na Figura 8 é possível notar uma pequena placa de circuito impresso ao lado do soquete da válvula, soldada nos terminais do conector USB fêmea fixado na base de MDF. Utilizamos este recurso para dar maior robustez à montagem, de modo a torná-la mais resistente ao encaixe/desencaixe das placas com LEDs. Se preferir, os fios podem ser soldados diretamente aos terminais do conector USB. Caso deseje soldar uma placa semelhante a esta, será necessário fazer um rebaixo de 5 mm na base de MDF (pois o conector USB não atravessa completamente a espessura da placa de MDF).

Por fim, uma última informação sobre a pintura. Utilizamos uma tinta spray preto fosco para pintar a lateral externa do tubo de PVC. Contudo, ao montar o experimento, notamos que mesmo com os LEDs desligados e com a válvula coberta pela lata de leite em pó (completamente no escuro) havia uma pequena corrente indicada pelo amperímetro. Descobrimos que a condução era realizada pela tinta, que estava em contato direto com o metal dos bornes. O problema foi resolvido colocando isolantes de plástico em cada borne, para evitar o contato direto do metal com a tinta. Esse problema também pode ser evitado se o tubo de PVC não for pintado, pois ele é um bom isolante.

4. Resultados Obtidos

Realizamos duas demonstrações experimentais utilizando a montagem descrita neste trabalho. A primeira permite verificar que a intensidade da luz não afeta a energia dos fotoelétrons emitidos, e a segunda possibilita determinar a constante de Planck por meio do gráfico da tensão de corte em função da frequência.

No primeiro caso utilizamos dois multímetros, um Minipa ET-2042D, configurado como voltímetro para

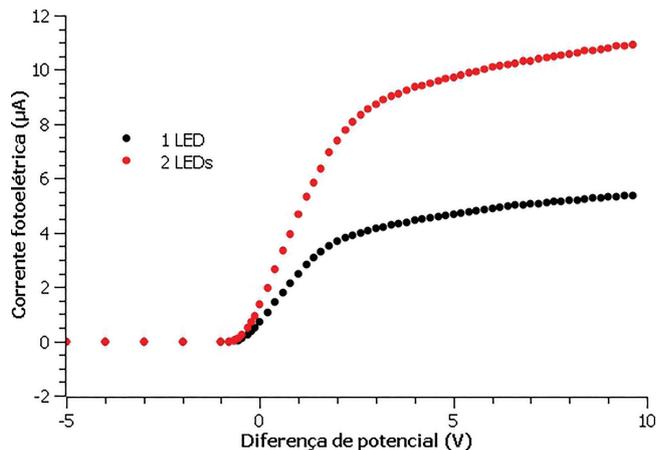


Figura 9: Gráfico da corrente fotoelétrica em função da diferença de potencial entre o anodo e o catodo para duas intensidades da luz verde.

medir tensões contínuas na faixa dos 20 V, e um Icel MD-1500, configurado como microamperímetro para medir correntes contínuas na faixa dos 20 μA . Realizamos a medida da corrente fotoelétrica em função da tensão anodo/catodo, variando esta última de -9 V até $+9\text{ V}$. O experimento foi feito utilizando um único LED, e em seguida, os dois LEDs (dobrando a intensidade da luz em relação à primeira situação). O resultado é mostrado no gráfico da Figura 9.

Como podemos ver, desde que a frequência seja suficiente para produzir o fenômeno, a intensidade afeta a quantidade de elétrons liberados, mas não a energia destes, pois as curvas começam a subir, basicamente, no mesmo valor do potencial de corte. Também fica evidente no gráfico a tendência da corrente se aproximar de um valor limite, caso em que todos os elétrons emitidos pelo catodo são coletados pelo anodo, o que ocorre quando o potencial deste se torna mais positivo em relação àquele. Note que a corrente, neste limite, dobra ao se utilizar dois LEDs, como esperado.

Realizamos a segunda demonstração utilizando os mesmos multímetros do experimento anterior, contudo, o resultado da constante de Planck obtido a partir do gráfico apresentou uma diferença de 6% em relação ao valor mais aceito. Provavelmente essa diferença se deve à impossibilidade de determinar o valor do potencial de corte com precisão, pois o multímetro Icel MD-1500 permite medições de corrente contínua com uma resolução máxima de $0,01\ \mu\text{A}$. Para contornar este problema poderíamos ter construído algum dos circuitos amplificadores encontrados na literatura [5, 20], no entanto, pela facilidade e disponibilidade, optamos por utilizar o picoamperímetro da empresa Kafts Technologies. A Figura 10 mostra a montagem completa com todos os dispositivos usados. O multímetro, configurado como voltímetro para medir tensões contínuas na faixa dos 20 V, mede a tensão anodo/catodo e o picoamperímetro a corrente fotoelétrica (lembramos que para efetuar as



Figura 10: Montagem para medir o potencial de corte em função da frequência da luz.

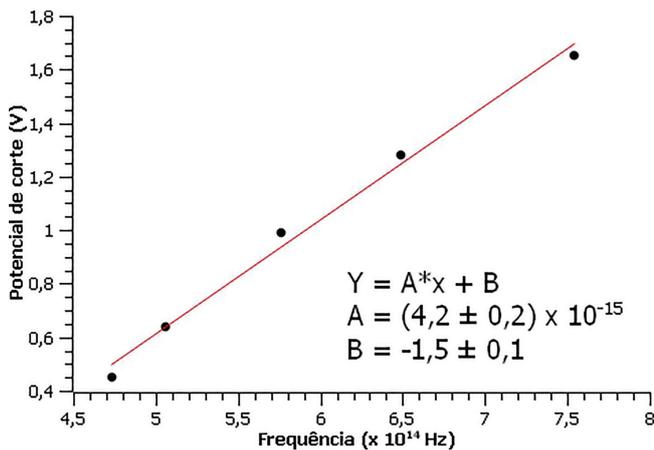


Figura 11: Gráfico do potencial de corte em função da frequência da luz.

medições cobrimos a célula fotoelétrica com a lata de leite em pó).

Nesta tomada de dados não variamos a intensidade. Ligamos o LED e ajustamos a tensão girando o potenciômetro, tornando o anodo negativo em relação ao catodo, de modo a zerar a corrente fotoelétrica. A tensão lida no voltímetro é o potencial de corte para determinada frequência (naturalmente, somado ao potencial de contato dos eletrodos). Realizando este procedimento para as diferentes frequências, obtivemos cinco pares de valores para o potencial de corte em função das cinco cores diferentes de luz utilizadas (o infravermelho não produziu o fenômeno, pois não possui energia suficiente para liberar elétrons do catodo). O resultado pode ser visto no gráfico da Figura 11.

A partir do coeficiente angular da reta, fornecido pela regressão linear realizada pelo software SciDAVis, encontramos o valor de $(6,7 \pm 0,3) \times 10^{-34}$ J·s para a constante de Planck. O valor obtido, em boa concordância com o valor esperado, corrobora o fato de que a determinação precisa do potencial de corte é fundamental para obter uma boa medida para o valor da constante de Planck. Conforme discutimos, não podemos dizer que o valor da constante B, 1,5 eV, seja a função trabalho do metal,

pois este valor contém o potencial de contato dos metais do anodo e do catodo.

Por fim, uma menção à questão do custo. Uma das orientações que seguimos ao desenvolver os experimentos é que seu custo seja menor que versões semelhantes encontradas no mercado. Considerando a montagem, incluindo o preço de dois multímetros Icel MD-1500 (que possui uma faixa de $20 \mu\text{A}$), o custo final fica em torno de R\$ 800,00, que é um preço 16 vezes menor que uma versão semelhante comercializada pela empresa 3B Scientific [33].

5. Considerações Finais

Apresentamos neste trabalho uma alternativa de custo reduzido para a realização de experimentos quantitativos sobre o efeito fotoelétrico. Diante da impossibilidade de adquirir este tipo de equipamento dos grandes fabricantes, devido ao alto custo, elaboramos um projeto que visa a adaptação de itens disponíveis para o desenvolvimento de experimentos para o laboratório didático de física.

Procuramos mostrar que as medidas realizadas se ajustam bem aos modelos teóricos elaborados para explicar o efeito fotoelétrico, o que permite discutir com os estudantes a validade destes modelos. Tanto no caso da independência da energia com a intensidade, quanto na dependência linear do potencial de corte com a frequência, mesmo a versão mais simples, usando multímetros digitais, forneceu bons resultados. Contudo, vimos que para aprimorar a qualidade dos dados é preciso utilizar equipamentos mais sofisticados, como o picoamperímetro, que nos permitiu determinar o valor da constante de Planck com uma diferença menor que 2% em relação ao valor estabelecido. Uma forma de evitar o custo do picoamperímetro seria testar a viabilidade de usar algum dos circuitos amplificadores sugeridos na literatura.

Nossa expectativa é que novas propostas que visam a ampliação do acesso de professores e instituições a experimentos de custo reduzido continuem sendo elaboradas. Temos vivido um momento difícil e estas ações contribuem para democratizar o acesso às atividades experimentais.

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Federal de Minas Gerais pelo apoio na realização do projeto mencionado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Ostermann e M. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **5**, 24 (2000).
- [2] A. Pereira e F. Ostermann, *Investigações em Ensino de Ciências* **14**, 395 (2009).
- [3] R. Silva e N. Errobidart, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 622 (2015).
- [4] A. Ahlgren, *The Physics Teacher* **1**, 183 (1963).
- [5] D. Boys, M. Cox e W. Mykolajenko, *American Journal of Physics* **46**, 133 (1978).

- [6] A. Azevedo, A. Sousa e T. Castro, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **41**, e20180349-1 (2019).
- [7] D. Halliday, R. Resnick e K. Krane. *Física 4* (LTC, Rio de Janeiro, 1996).
- [8] S. Arruda e D. Filho, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **8**, 393 (1991).
- [9] R. Paranhos, V. Lopez-Richard e P. Pizani, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 4502-4 (2008).
- [10] J. Filho, M. Salami e V. Hillebrand, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 555 (2006).
- [11] S. Silveira e M. Girardi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e4502-2 (2017).
- [12] D. Eberhardt, J. Filho, R. Lahm e P. Baitelli, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 935 (2017).
- [13] G. Spagnolo, A. Postiglione e I. Angelis, *Physics Education* **55**, 055011-3 (2020).
- [14] M. Cavalcante e R. Haag, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 343 (2005).
- [15] L. Silva e A. Assis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **29**, 313 (2012).
- [16] E. Santos, R. Menezes Jr. e V. Santana, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 824 (2015).
- [17] A. Cortel, *The Physics Teacher* **44**, 310 (2006).
- [18] C. Chen e C. Zhang, *The Physics Teacher* **37**, 442 (1999).
- [19] A. Beehler, *The Physics Teacher* **48**, 348 (2010).
- [20] H. Gottlieb, *The Physics Teacher* **3**, 380 (1965).
- [21] R. Ellefson, *American Journal of Physics* **38**, 767 (1970).
- [22] RCA, *Phototubes and photocells: technical manual PT-60* (Radio Corporation of America, Lancaster, 1963).
- [23] PASCO, *Instruction manual and experiment guide for the PASCO scientific model AP-9368 and AP9369: h/e apparatus and h/e apparatus accessory kit* (PASCO Scientific, Roseville, 1989).
- [24] R. Bobst e E. Karlow, *American Journal of Physics* **53**, 911 (1985).
- [25] W. Garver, *The Physics Teacher* **44**, 272 (2006).
- [26] A. James, *Physics Education* **8**, 382 (1973).
- [27] D. Lloyd, *American Journal of Physics* **83**, 766 (2015).
- [28] C. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e3602-5 (2018).
- [29] Y. Kraftmakher, *American Journal of Physics* **74**, 941 (2006).
- [30] S. Chakarvarti e B. Sharma, *Physics Education* **23**, 250 (1988).
- [31] F. Loporco, M. Malagoli, S. Rainò e P. Spinelli, *European Journal of Physics* **38**, 025208-3 (2017).
- [32] RCA, *Photosensitive devices and cathode-ray tubes* (Radio Corporation of America, Harrison, 1960).
- [33] <https://www.3bscientific.com.br/constante-de-planck-aparelho-115-v-5060-hz-1000536-u10700-115-3b-scientific.p663.16634.html>, acesso em 16/04/2021.