

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS – *CAMPUS* BAMBUÍ  
LICENCIATURA EM FÍSICA

Lucas Luís Ferreira Rodrigues

**CONSTRUÇÃO DE UM CIRCUITO FOTOELÉTRICO (FOTOEMISSIVO) COM  
MATERIAIS ACESSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO COMO RECURSO DIDÁTICO NO  
ENSINO MÉDIO**

BambuÍ

2025

LUCAS LUÍS FERREIRA RODRIGUES

**CONSTRUÇÃO DE UM CIRCUITO FOTOELÉTRICO (FOTOEMISSIVO) COM  
MATERIAIS ACESSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO COMO RECURSO DIDÁTICO NO  
ENSINO MÉDIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Licenciatura em Física do Instituto  
Federal de Minas Gerais – *Campus* Bambuí  
para obtenção do grau de licenciado em Física.  
Orientador: Fabrício Vieira Andrade

Bambuí

2025

---

**Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - *Campus Bambuí***

---

R696c Rodrigues, Lucas Luís Ferreira.

Construção de um circuito fotoelétrico (fotoemissivo) com materiais acessíveis para utilização como recurso didático no Ensino Médio [manuscrito] / Lucas Luís Ferreira Rodrigues. – 2025.

27 f. : il. : color.

Orientador: Fabrício Vieira Andrade.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. *Campus Bambuí*, 2025.

1. Efeito fotoelétrico. 2. Célula fotoemissiva. 3. Experimento no Ensino Médio. I. Andrade, Fabrício Vieira. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus Bambuí*. III. Título.

CDD 537.6

---

**Catálogo: João Batista Rodrigues - CRB-6/2022**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS  
Campus Bambuí  
Diretoria de Ensino  
Departamento de Ciências e Linguagens  
Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG  
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

Lucas Luís Ferreira Rodrigues

**CONSTRUÇÃO DE UM CIRCUITO FOTOELÉTRICO (FOTOEMISSIVO) COM  
MATERIAIS ACESSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO COMO RECURSO DIDÁTICO NO  
ENSINO MÉDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de  
Licenciatura em Física do Instituto Federal de Minas Gerais –  
Campus Bambuí para obtenção do grau de licenciado(a) em  
Física.

Aprovado em: 31/01/2025 pela banca examinadora:

Prof. Dr. Fabricio Vieira Andrade – IFMG - *Campus Bambuí* (Orientador)

Prof.<sup>a</sup> Dr. João Henrique Rodrigues – IFMG - *Campus Bambuí*

Prof. Dr. Mayler Martins – IFMG - *Campus Bambuí*



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Vieira Andrade, Professor**, em 31/01/2025, às 14:32, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Joao Henrique Rodrigues, Professor**, em 31/01/2025, às 14:33, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Mayler Martins, Professor**, em 31/01/2025, às 14:33, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2172525** e o código CRC **0E27D76B**.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a toda a família por parte de mãe, isso através do núcleo familiar da madrinha Cecília, que contribuiu de modo decisivo para um acesso educacional de boa qualidade em diversos momentos. Já os agradecimentos a toda a família por parte de pai, por intermédio do núcleo familiar da tia Patrícia, a qual muito contribuiu de modo significativo acolhedor em certos momentos passados específicos que, na época, refletiam grandes obstáculos emotivos então difíceis para mim. Aos meus professores do núcleo de física, agradeço imensamente, isso por meio do docente que orientou este trabalho, o professor Fabrício, e assim o meu muito obrigado. Já aos professores que tive pertencentes a outros núcleos: português, biologia, química, matemática, pedagogia, psicologia, filosofia e sociologia, em igualdade de imensidão, agradeço através da pessoa da professora Luciana, do núcleo pedagógico. E por intermédio ainda desses dois professores supracitados, estendo também agradecimento enfático a toda a comunidade do IFMG campus Bambuí, englobando então estudantes, concursados efetivos e temporários, bem como terceirizados, independentemente do nível de escolaridade, função e hierarquia. Agradeço, em igualdade de consideração emitida há pouco à comunidade do IFMG campus Bambuí, às comunidades das escolas estaduais João Batista de Carvalho e José Alzamora, onde participei do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação à Docência e realizei meu estágio, respectivamente, então significativo agradecimento que faço via a pessoa do professor Juliano, o qual leciona na segunda escola estadual mencionada. Quero ainda agradecer de modo também bastante significativo a minha amiga e psicóloga, Regina. Por fim, para essa primeira parte, agradeço em condição de distinta especialidade, com verdadeiro imenso carinho, ao meu próprio núcleo familiar, através da pessoa da minha mãe sim, Maria, mas citarei também o nome dos demais: os cunhados Gustavo e Daniel, meu padrasto, Ronaldo, meus dois irmãos, Alexandre e Átila, e minha irmã, Stefânia.

Em segundo, em caráter pois eterno, e assim sempre o primeiro em importância: a Deus. Portanto agradecimento que transcende a conquista profissional nessa realidade realizada, ou qualquer outro motivo que seja pertencente a essa vida mortal, em gratidão elevada para com a problemática primeira sentimental, a qual somente é incentivada no secundário pertencente à realidade externa com sucessão de eventos cotidianos que marcam o viver nessa esfera existencial, porque todos os laços sociais, profissionais e familiares se quebram na morte, uma vez que tudo no Universo sendo onda, ou conversível em onda, logo o fenômeno

sentimental é, em verdade primeira, também um fenômeno ondulatório, em outras palavras, somos fontes emissoras ininterruptas de um tipo de onda, a sentimental, e na morte, convivemos em campo sentimental composto apenas por frequências iguais àquela que emitimos, isso não perturba: a verdadeira felicidade, onde portanto o convívio é entre personalidades as quais não escolhemos, pois não há preferência para Deus, assim graciosa separação natural na morte que só possibilita o viver entre mesmas frequências, independentemente das personalidades donas dessas frequências: logo, como dito, todo convívio entre personalidades sendo temporário, tanto nessa existência, quanto no túmulo: a cada renascer após a falência corporal nessa realidade (após o espírito imergir em campo sentimental composto por diferentes frequências, o que incentiva a oscilação frequencial, a qual possibilita o aumento do valor da frequência: o evoluir) uma nova frequência atingida, um novo campo sentimental portanto entre iguais intensidades emotivas e servindo de morada para o espírito. E assim universos se vão, e nossa semelhança com Deus cada vez mais em gratidão de autoexistência se eleva, fortalece-se: o aumentar do gozo autoexistencial em eterno progressivo avolumar, que já sendo a maior recompensa em si. Gratidão pois infinita a Deus, encerrando aqui assim os meus agradecimentos.

## RESUMO

O presente trabalho consiste na construção de um circuito fotoelétrico, com a utilização de materiais acessíveis e um multímetro capaz de medir a resistência elétrica na faixa de 20 M $\Omega$ . Este trabalho se justifica porque pode incentivar o professor a realizar uma aula que não seja meramente expositiva e, ao mesmo tempo, abordar um tema de Física moderna. Também, porque a construção do experimento é simples e de baixo custo, os materiais são acessíveis e a radiação ultravioleta da lâmpada é de baixa intensidade. Primeiro, foi construído uma célula fotoemissiva com uma placa de alumínio, tela de aço inox e tela de *nylon*. Depois foi montado um circuito contendo essa célula e três transistores do tipo NPN. Para produzir o efeito fotoelétrico foi utilizado uma lâmpada ultravioleta de 5 W, utilizada normalmente em aquário. Ela foi colocada em cima da célula e para medir o efeito fotoelétrico foi utilizado um multímetro na função ohmímetro. São discutidas ainda algumas dificuldades enfrentadas na realização do experimento, com intuito à facilitação de sua aplicação por professores dentro da sala de aula ou laboratório de ciência, quando for o caso da escola possuir este espaço. Por último, pode se dizer que este trabalho mostra que é viável a construção de um experimento que explore o efeito fotoelétrico com materiais de baixo custo e acessíveis, também pode de afirmar que o efeito fotoelétrico é facilmente percebido pela alteração da resistência elétrica indicada no multímetro. Portanto, o professor, ao propor utilizar tal experimento em sala de aula, não terá dificuldade de construir, nem de demonstrar tal efeito e com pouco risco devido à baixa intensidade da radiação ultravioleta.

**Palavras-chave:** Efeito fotoelétrico. Célula fotoemissiva. Experimento no Ensino Médio.

## ABSTRACT

The present work consists of constructing a photoelectric circuit using accessible materials and a multimeter capable of measuring electrical resistance in the range of 20 M $\Omega$ . This work is justified as it may encourage teachers to conduct a lesson that is not merely expository while addressing a topic in modern physics. Additionally, the experiment is simple and low-cost to construct, the materials are accessible, and the ultraviolet radiation from the lamp is of low intensity. First, a photoemissive cell was built using an aluminum plate, a stainless steel screen, and a nylon screen. Then, a circuit was assembled containing this cell and three NPN-type transistors. A 5 W ultraviolet lamp, commonly used in aquariums, was used to produce the photoelectric effect. The lamp was placed above the cell, and a multimeter set to the ohmmeter function was used to measure the photoelectric effect. Some difficulties encountered during the experiment are discussed to facilitate its application by teachers in classrooms or science laboratories, if the school have such a space. Finally, it can be said that this work demonstrates the feasibility of constructing an experiment to explore the photoelectric effect using low-cost and accessible materials. It can also be stated that the photoelectric effect is easily observed through the change in electrical resistance indicated on the multimeter. Therefore, teachers proposing to use such an experiment in class will face no difficulty in constructing or demonstrating the effect, with minimal risk due to the low intensity of ultraviolet radiation.

**Keywords:** Photoelectric effect. Photoemissive cell. High school experiment.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>O efeito fotoelétrico .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.1</b>	<i>Efeito fotoelétrico do tipo fotovoltaico .....</i>	<b>12</b>
<b>2.1.2</b>	<i>Efeito fotoelétrico do tipo fotocondutivo .....</i>	<b>13</b>
<b>2.1.3</b>	<i>Efeito fotoelétrico do tipo fotoemissivo .....</i>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Abordagem do efeito fotoelétrico em alguns trabalhos acadêmicos .</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>26</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>27</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito fotoelétrico foi observado experimentalmente por Hertz em 1887, e explicado por Einstein em 1905, e sendo uma das razões que levaram ao prêmio Nobel dado a Einstein em 1921. A explicação que comportou o entendimento teórico quanto à possibilidade de comportamento da luz como o somatório de pequenas partículas, posteriormente chamadas de fótons, em que cada fóton interage com um elétron, ejetando-o, quando há pois a ocorrência de corrente fotoelétrica.

Considera-se que há três tipos de células fotoelétricas: fotovoltaica, fotocondutiva e fotoemissiva. No parágrafo acima, o tipo de efeito fotoelétrico citado é do tipo fotoemissivo, o único em que há ejeção de elétrons de fato. Há pouquíssimas propostas experimentais para ensino básico envolvendo célula fotoemissiva: conseguir célula fotovoltaica e fotocondutiva é relativamente bem mais fácil, porém não correspondem ao efeito por Hertz observado e por Einstein explicado.

Dos três processos fotoelétricos existentes, o fotoemissivo é pouco utilizado para fins tecnológicos e assim já quase não existem mais células no mercado, e células para fins didáticos são caras. Todavia sendo o experimento que melhor demonstra o comportamento de partículas da luz (a luz estudada não como onda), deste modo muito justifica-se seu estudo em sala de aula, por isso que a produção de trabalhos como este sendo importante.

Assim, propomos a construção de um experimento que se consiste em um circuito elétrico dotado de uma célula fotoemissiva, construído a partir de materiais acessíveis, em que se possa detectar a corrente fotoelétrica com um multímetro capaz de medir a resistência elétrica na faixa de  $20\text{ M}\Omega$ , em outras palavras: é viável a construção de um experimento capaz de medir o efeito fotoelétrico com materiais acessíveis e de baixo custo? Portanto o objetivo central deste trabalho é a construção de um experimento para medição do efeito fotoelétrico com materiais acessíveis, logo algumas etapas para o cumprimento desse objetivo serão realizadas, e são elas: a construção de uma célula fotoemissiva; a montagem de um circuito amplificador do sinal da corrente fotoelétrica; e a medição do efeito fotoelétrico com o multímetro.

Este trabalho se justifica em quatro pilares: o primeiro sendo que, do ponto de vista didático, discute-se cada vez mais a necessidade de alternativas ao ensino baseado em aulas meramente expositivas, e, na Física, grande parte dessa discussão defende a utilização experimental para uma melhor percepção cognitiva em relação aos conteúdos trabalhados, bem como uma maior contextualização com intuito de uma possível melhor acomodação dos conhecimentos abordados; em segundo, trata-se de matéria pertencente à física moderna,

conteúdo pouco explorado no ensino médio; por terceiro, a segurança dos alunos quando envolvidos em experimentação com utilização de fonte luminosa emitindo radiação em ultravioleta; por fim, há poucas publicações que abordam a possibilidade de construção de uma célula fotoemissiva para fins didáticos, principalmente com materiais acessíveis e de baixo custo.

Para finalizar, este trabalho é dividido em cinco capítulos. O primeiro consiste na introdução; o segundo, o referencial teórico; no terceiro, a metodologia utilizada; no quarto, resultados e discussão; por fim, quinto e último capítulo, as considerações finais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é discutido sobre o efeito fotoelétrico e seus três tipos de ocorrência, como também sobre alguns trabalhos acadêmicos abordando o efeito fotoelétrico para o ensino.

### 2.1 O efeito fotoelétrico

Um ensino mais contextualizado muitas vezes começa não com a apresentação direta do conteúdo, mas com a aplicação prática do que será estudado. Isso pode ser feito, por exemplo, com utilização de uma pergunta inicial ou de uma situação-problema que envolva o tema da aula. A geração de energia elétrica é um ótimo exemplo para esse tipo de abordagem, já que a sociedade depende da eletricidade no dia a dia. Refletir sobre como essa energia é produzida é essencial, e para isso, é importante conhecer os diferentes métodos de geração.

O que alteraria em nosso cotidiano, caso não pudéssemos mais utilizar energia elétrica? De onde vem essa energia? Quais são alguns exemplos de modo de produção? Quais desses são limpos e renováveis? A energia solar sendo um exemplo de resposta à última pergunta, e muita gente consegue associar a produção de energia elétrica a partir de energia solar via a utilização de placas fotovoltaicas. Havendo também a possibilidade da utilização de espelhos côncavos para convergência de raios solares para um reservatório de água, com objetivo de esquentar, gerar vapor e assim o utilizar de sua pressão para a obtenção de energia cinética rotacional (girar uma turbina), a qual é convertida em energia elétrica por meio do fenômeno de indução eletromagnética.

A maioria das formas de geração de eletricidade envolve a produção de energia mecânica rotacional, que depois é convertida em energia elétrica por indução eletromagnética. Isso acontece na queima de combustíveis, na fissão nuclear e na energia geotérmica, onde o calor gera vapor para movimentar turbinas. Também ocorre na energia eólica, hidrelétrica e das marés, onde o movimento da água ou do vento faz girar um gerador. No entanto, as placas fotovoltaicas funcionam de um jeito diferente. Elas transformam diretamente a luz do Sol em eletricidade, sem precisar de partes móveis ou do princípio da indução eletromagnética. Mas como isso acontece?

Se dito foi que o princípio de indução eletromagnética é utilizado por demais modos de produção de energia elétrica, qual é então o princípio presente no funcionamento de uma placa fotovoltaica, a exceção citada? O efeito fotoelétrico. Toda vez que houver energia luminosa diretamente contribuindo para o acontecer de fluxo de carga elétrica, há o efeito

fotoelétrico envolvido, que pode ocorrer de três formas, sendo que a funcionalidade da placa fotovoltaica se baseia em um desses três tipos: o efeito fotovoltaico.

### ***2.1.1 Efeito fotoelétrico do tipo fotovoltaico***

Células fotovoltaicas são produzidas com materiais semicondutores cuja condutividade elétrica é aumentada quando expostos à luz (a tensão aumenta), assim materiais que podem contribuir para a geração de corrente elétrica. O efeito fotovoltaico é chamado por alguns autores de efeito fotoelétrico interno, por não haver ejeção direta de elétrons do material.

Haja vista a construção de uma célula fotovoltaica, o silício sendo um material bastante utilizado, que pode passar primeiramente por processos chamados de dopagem, os quais se baseiam pela adição de porcentagem de outros materiais. A razão da dopagem é produzir dois tipos de semicondutores com similitude de tendência em termos da capacidade portadora de carga elétrica, porém com a discrepância de ser tal tendência inversa ao considerar o sinal dessa carga:

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é mal condutor elétrico. Para alterar isso acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentando Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P). Cada célula solar compõe-se de camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P. (NASCIMENTO, 2004, p.7)

Um material produzido pela junção entre duas camadas de semicondutores com essa tendência favorece o aparecimento de tensão, e quando fótons são absorvidos pela camada com tendência portadora de carga negativa, energia suficiente é obtida para liberar elétrons de suas prisões atômicas, e assim esses passam a se moverem livremente pela estrutura, aumentando a condutividade elétrica do material. Conectando-se a camada negativa à positiva, enquanto na incidência de radiação luminosa, gera-se fluxo de elétrons.

### **2.1.2 Efeito fotoelétrico do tipo fotocondutivo**

O efeito fotocondutivo, assim como o efeito fotovoltaico, é um tipo de efeito fotoelétrico interno, pois não expulsa elétrons diretamente do material. Ele ocorre em semicondutores, que aumentam sua condutividade elétrica quando expostos à luz. No efeito fotovoltaico, isso acontece porque a luz gera uma tensão elétrica. Já no efeito fotocondutivo, a luz reduz a resistência elétrica do material, facilitando a movimentação dos elétrons.

Utiliza-se um material cuja resistência é diminuída por absorção de energia luminosa, por isso conhecido por Resistor Dependente de Luz: LDR (*Light Dependent Resistor*). “A ação dos fótons incidentes nesses materiais causa a quebra de ligações covalentes, o que aumenta o número de elétrons livres na banda de condução do material, alterando, assim, a resistência do dispositivo e, conseqüentemente, a corrente no circuito.” (SILVA e ASSIS, 2012, p.321).

Então, as duas formas que se podem chamar de efeito fotoelétrico interno, sem assim ejeção direta de elétrons: a fotovoltaica e a fotocondutiva; com a utilização de semicondutores e com o movimentar de elétrons por se aumentar a tensão e se reduzir a resistência do material, respectivamente, a partir da absorção de energia luminosa. O terceiro tipo de efeito fotoelétrico sendo o efeito fotoemissivo, nesse já há a ejeção direta de elétrons de um material exposto à radiação luminosa. Nos dois primeiros casos, os elétrons percorrem o circuito sem a necessidade de saltar, já nesse terceiro, placas metálicas, a uma certa distância entre si, representam uma interrupção no circuito, em que os elétrons então saltam de uma placa para outra quando ocorre absorção de fótons, garantindo a passagem da corrente pelo circuito: isso que significa dizer que há ejeção direta de elétrons do material.

### **2.1.3 Efeito fotoelétrico do tipo fotoemissivo**

Incidindo-se um feixe de luz, em certa frequência, sobre um metal e elétrons não são arrancados, pode-se aumentar a intensidade do feixe indefinidamente que elétrons não começarão a ser arrancados. Ao se incidir um feixe de luz em certa frequência sobre um metal e elétrons são arrancados, pode-se aumentar a intensidade do feixe indefinidamente que a velocidade com que esses elétrons são arrancados não aumenta, mas aumenta o número de elétrons arrancados.

Para esse entendimento, a radiação luminosa tem que ser considerada como um somatório de pequeníssimos corpúsculos (fótons), onde cada frequência possui um valor de energia fixo para seus fótons, e quanto maior a frequência do feixe de luz, maior é esse valor de energia carregado por cada fóton. Se elétrons não são ejetados, significa que o feixe luminoso é constituído por fótons cuja energia sendo menor que a energia necessária para arrancar um elétron, e aumentar a intensidade de tal feixe sendo aumentar o número de fótons sem se alterar a energia de cada fóton, por isso que foi dito que se pode aumentar a intensidade indefinidamente e que, mesmo assim, elétrons não começaram a ser ejetados.

Caso elétrons sejam ejetados, significa que cada fóton constituinte do feixe de luz possui energia maior que a energia necessária para se arrancar um elétron, e a quantidade de energia do fóton que sobra da ejeção de um elétron é utilizada para dar velocidade a esse elétron então ejetado. Aumentar a intensidade do feixe é aumentar a quantidade de fótons emitidos, sem alterar a energia de cada fóton, por isso que foi dito que um aumento de intensidade não é capaz de aumentar a velocidade com que elétrons são ejetados, mas consegue aumentar o número de elétrons ejetados.

Cada metal tem uma estrutura eletrônica única, pois seus átomos interagem de maneiras diferentes, influenciando a forma como seus elétrons são mantidos no material. Em metais onde os elétrons estão menos presos, é mais fácil ejetá-los. Já em outros metais, é preciso fornecer mais energia para remover os elétrons. Embora os elétrons em metais sejam considerados livres, cada tipo de metal oferece uma resistência diferente à sua ejeção. A energia necessária para ejetar um elétron é chamada de função trabalho, por isso que cada metal possui um valor específico de função trabalho: quanto maior a função trabalho, maior a necessidade de um fóton mais energético para se realizar a ejeção de um elétron, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – O valor da função trabalho para alguns metais

<b>METAL</b>	<b>FUNÇÃO TRABALHO (eV)</b>
Alumínio	4,08
Cobre	4,70
Ferro	4,50
Platina	6,35
Prata	4,73
Zinco	4,30

Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm> (Acesso: 27 mar. 2024)

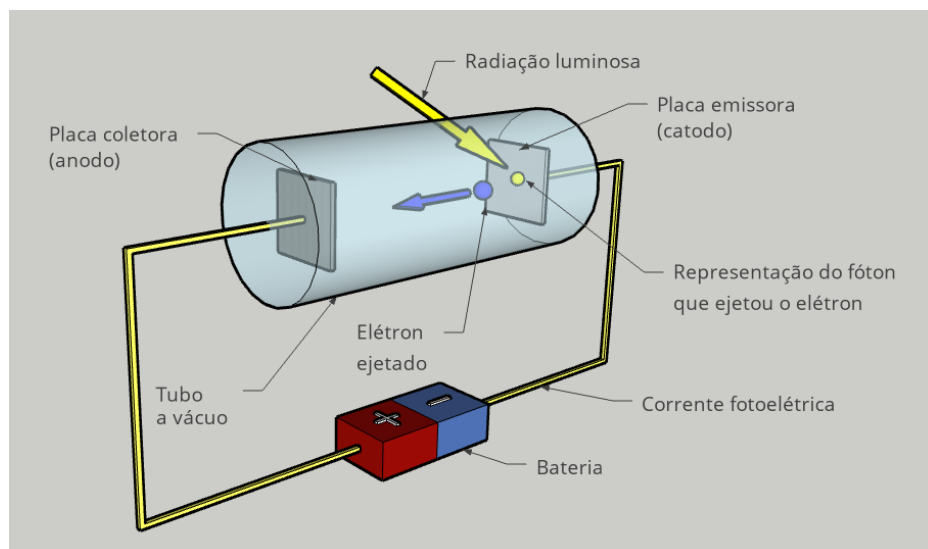
O entendimento quanto ao considerar de um feixe de luz consoante o somatório de pequenínissimos corpúsculos com energia quantizada (fótons) foi a maneira encontrada por Einstein para explicar o efeito fotoelétrico: partiu da consideração de aplicação da quantização de energia proposta por Planck, em 1900, aplicando-a à luz, portanto a energia ( $E$ ) de um fóton sendo o produto entre a constante de Planck ( $k$ ) e a frequência ( $f$ ):  $E = hf$ .

Se a energia de um fóton for maior que a função trabalho de um metal, ele pode ejetar um elétron. A energia que sobra do fóton se transforma em energia cinética do elétron. Isso significa que, quanto maior for a energia extra do fóton além do necessário para ejetar o elétron, maior será a velocidade com que esse elétron será lançado para fora do metal.

Em outras palavras, a energia de um fóton é, em parte, utilizada para ejetar um elétron e, na parte restante, transforma-se em energia cinética adquirida por esse elétron, logo sendo correto afirmar que: se somarmos a energia necessária para ejetar um elétron – a função trabalho ( $\Phi$ ) – com a energia cinética ( $k$ ) adquirida pelo elétron, essa soma tem que ser igual à energia ( $E$ ) do fóton:  $E = \Phi + k$ .

Pode-se dizer também que há função trabalho (uma energia que necessita ser vencida para a ocorrência de efeito fotoelétrico) nos efeitos do tipo fotovoltaico e fotocondutivo, porém nesses casos a função trabalho não corresponde à energia necessária para ejetar elétron (como já visto, a ejeção direta de elétrons, para fora então da estrutura material a qual pertencem, ocorrendo através de um só tipo de efeito fotoelétrico: o efeito fotoemissivo), e sim correspondendo à energia necessária para promover elétrons livres no material, elétrons que então percorrem o circuito.

Figura 1 – Representação esquemática de um circuito fotoelétrico clássico



Elaborado pelo autor, 2024

Observando a Figura 1, pode-se notar, como já afirmado, que há uma descontinuidade no circuito, uma interrupção na região entre as placas, portanto só havendo corrente elétrica mediante o salto de elétrons de uma placa para outra, e a permissão (energia) para tal salto origina da absorção de fótons. Em células fotovoltaicas e fotocondutivas não existe em momento algum uma descontinuidade no circuito, assim elétrons transitam na incidência de luz devido à absorção dessa energia luminosa proporcionar variações em grandezas físicas, aumentando a tensão e reduzindo a resistência dos semicondutores nos então efeitos fotovoltaico e fotocondutivo, respectivamente.

Ainda com os olhos na Figura 1, a representação de um circuito fotoelétrico clássico: duas placas metálicas, uma com valor de função trabalho mais baixo, para o desempenhar do papel de ser emissora de elétrons (catodo), conectada ao negativo da bateria, enquanto a outra placa com valor de função trabalho mais alto, para ser coletora de elétrons (anodo), conectada ao positivo da bateria. O fóton que ejetou o elétron está representado por dois motivos na imagem: ao estudar o efeito fotoelétrico, um feixe de luz deve ser considerado consoante um somatório de partículas (fótons); e a ocorrência do efeito fotoemissivo em termos de interação fóton-elétron sempre acontece na proporção de um pra um: um fóton interage com um elétron, fornecendo o fóton toda a sua energia, assim a parte que não é gasta para o ejetar do elétron, é transformada em energia cinética adquirida pelo elétron então ejetado.

## **2.2 Abordagem do efeito fotoelétrico em alguns trabalhos acadêmicos**

Demonstrar o efeito fotocondutivo em experimentos é relativamente fácil e barato, pois sensores LDR (resistores dependentes de luz) são acessíveis. Para testar, basta apontar um laser para o LDR, reduzindo sua resistência elétrica e permitindo a passagem de corrente em um circuito. Um exemplo desse experimento foi descrito no Caderno Brasileiro de Ensino de Física (SILVA e ASSIS, 2012, p. 317), onde se afirma: "Para testar o funcionamento do circuito, basta iluminar o LDR com um laser. Se o LED ascender, é porque está tudo conectado corretamente."

Já o efeito fotovoltaico é um dos mais fáceis de entender no contexto tecnológico, pois está diretamente ligado às discussões sobre fontes de energia limpa. As placas fotovoltaicas, cada vez mais comuns em edifícios, convertem luz em eletricidade ao absorver fótons e gerar corrente elétrica. Assim como os LDRs, as células fotovoltaicas são fáceis de encontrar. Um experimento que utilizou um painel fotovoltaico de 5 W foi apresentado por REIS (2019).

Quanto ao efeito fotoemissivo, serão citados quatro experimentos que podem ser divididos em duas categorias: efeito fotoemissivo sem, e efeito fotoemissivo com produção de corrente fotoelétrica.

Dois experimentos sem produção de corrente fotoelétrica, os quais se consistem na observação do descarregar de um eletroscópio que sendo conectado a uma placa metálica, formando com esta um sistema que, no início, está carregado negativamente (excesso de elétrons), assim, quando se incide radiação ultravioleta na placa, elétrons são ejetados (são ejetados simplesmente, não originando uma corrente fotoelétrica), descarregando o sistema (FERREIRA, 2020) e (SOUSA, 2020).

Um experimento de baixo custo com reutilização de material, uma lâmpada néon do modelo NE2H, onde eletrodos metálicos internos ao bulbo são utilizados como célula fotoemissiva para a geração de corrente fotoelétrica (EBERHARDT, *et. al.*, 2017). O outro artigo aqui citado como exemplo, com experimentação produzindo corrente fotoelétrica a partir de célula fotoemissiva, é o experimento em (FILHO, SALAMI e HILLEBRAND, 2006), o artigo base para este trabalho.

Além desses trabalhos, interessante artigo, Silva e Errobidart (2015), ainda foi considerado, onde os autores analisaram 41 artigos relacionados ao ensino do efeito fotoelétrico, de oito periódicos (Quadro 1), classificando tais artigos em sete categorias, conforme Quadro 2.

Quadro 1 – Quantidade de artigos por periódico

<b>PERIÓDICOS</b>	<b>Nº de ARTIGOS</b>
Caderno Brasileiro de ensino de Física (CBEF)	11
Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)	07
A Física na Escola (FNE)	06
História da Ciência e do Ensino (HCE)	01
Physics Education (PE)	07
Science & Education (SE)	05
American Journal of Physics (AJP)	03
American Institute of Physics (AIP)	01
<b>TOTAL</b>	<b>41</b>

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Silva e Errobidart, 2015

Quadro 2 – Quantidade de artigos por categoria

<b>CATEGORIA</b>	<b>TEMA</b>	<b>Nº de ARTIGOS</b>
A	Fundamentação teórica ou conceitual	05
B	Descrição de analogias e situações de contextualização	05
C	Aspectos de HFC	07
D	Propostas ou relatos mediados por simulação computacional	11
E	Propostas ou relatos mediados por HFC	03
F	Propostas ou relatos mediados por experimentação	08
G	Análise de livros didáticos ou manuais	02
<b>TOTAL</b>		<b>41</b>

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Silva e Errobidart, 2015

Dos oito artigos envolvendo experimentação, apenas um executa a construção de um experimento fotoelétrico clássico, onde, portanto, a célula fotoelétrica utilizada é do tipo fotoemissivo, justamente o artigo tomado como base para a elaboração desse trabalho. Maioria dos artigos nessa categoria se utilizam do efeito fotoelétrico do tipo fotocondutivo:

Em resumo, os trabalhos descritos nesta categoria relatam sugestões para construção de aparatos experimentais de baixo custo, os quais permitiriam ao professor fazer a demonstração do efeito fotoelétrico em sala de aula. Em sua maioria, estes aparatos fazem uso de um resistor dependente da intensidade luminosa – LDR e dos princípios físicos aplicados ao funcionamento de controles remotos. (SILVA e ERROBIDART, 2015, p.632)

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, com objetivo explicativo, e através de procedimento experimental, com abordagem qualiquantitativa, tratando-se pois de uma reprodução experimental clássica para observação da ocorrência do efeito fotoelétrico explicado teoricamente por Einstein em 1905, com intuito de poder ser algo então aplicável como recurso didático complementar dentro da sala de aula do ensino médio, portanto um trabalho que pode estar presente na construção de um produto didático de base experimental, o qual vise à melhoria do processo de ensino aprendizagem sobre a teoria existente em relação a tópico pertencente à física moderna: o efeito fotoelétrico.

Para a montagem do circuito fotoelétrico, considerando a primeira parte referente à construção da célula fotoemissiva, necessitam-se de uma panela de alumínio, polida com palha de aço e limpa com papel toalha seco; tela de aço inox retirada de uma peneira de cozinha, e de um pedaço obtido de uma tela de *nylon*.

A tela de *nylon* foi colocada entre a panela e a tela de inox. As telas sendo necessárias porque são estruturas que permitem a passagem de luz, para assim fótons poderem atingir a superfície de alumínio da panela, ejetando elétrons que tendem a movimentar da panela para a tela de inox. E a tela de náilon é colocada no meio para isolar as partes metálicas, de tal forma que esses metais não fiquem em contato, caso contrário o circuito pode ser danificado.

Figura 2 – Panela de alumínio, tela de náilon e tela de aço inox



Elaborado pelo autor, 2024

Fazendo uma comparação com o sistema de tubo a vácuo com as placas metálicas constituintes da célula fotoemissiva clássica, representada anteriormente, na Figura 1, corresponde então, no experimento que se pretende construir, à panela de alumínio (placa emissora) e à tela de aço inox de uma peneira (placa coletora), com uma tela de náilon de 1 mm de espessura garantindo uma região espacial entre as placas, e assim as mantendo isoladas entre si.

Para a montagem do restante do circuito fotoelétrico: sete cabos com garra jacaré em uma das pontas; um multímetro simples que pode ser encontrado facilmente nos laboratórios das escolas públicas de ensino médio; uma bateria de 9 V; uma lâmpada ultravioleta de aquário com 5 W de potência; oito fios para a conexão dos transistores no circuito com a utilização de uma placa *proto-board*; três transistores NPN BC549; e uma placa *proto-board*.

Quadro 3 – Lista de materiais para montagem do circuito fotoelétrico por etapas

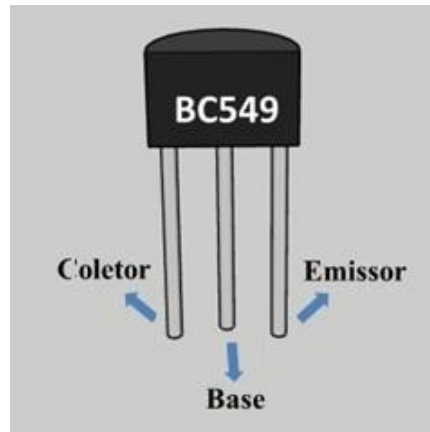
ETAPAS	MATERIAIS
Célula Fotoemissiva	01 panela de alumínio
	01 tela de aço inox retirada de uma peneira
	01 pedaço de tela de náilon
Sistema Amplificador	08 fios para conexões na placa <i>proto-board</i>
	01 transistores NPN BC549
	01 placa <i>proto-board</i>
Restante do Circuito	07 cabos (garra jacaré numa das pontas)
	01 multímetro (mínimo de 20 M $\Omega$ )
	01 bateria de 9 V
	01 lâmpada ultravioleta de aquário (5 W)

Elaborado pelo autor, 2024

Na placa *proto-board*, os transistores serão montados em série. Transistores são capazes de amplificar baixas correntes elétricas, assim o objetivo em colocá-los em série sendo amplificar essa capacidade de ampliar corrente. E, em série, a amplificação resultante é obtida pelo produto entre as capacidades individuais de amplificar de cada transistor que será utilizado

na montagem do experimento. Esse modelo de transistor, montando-se três em série, será capaz de fornecer um aumento de corrente da ordem  $10^7$  no circuito fotoelétrico que será construído.

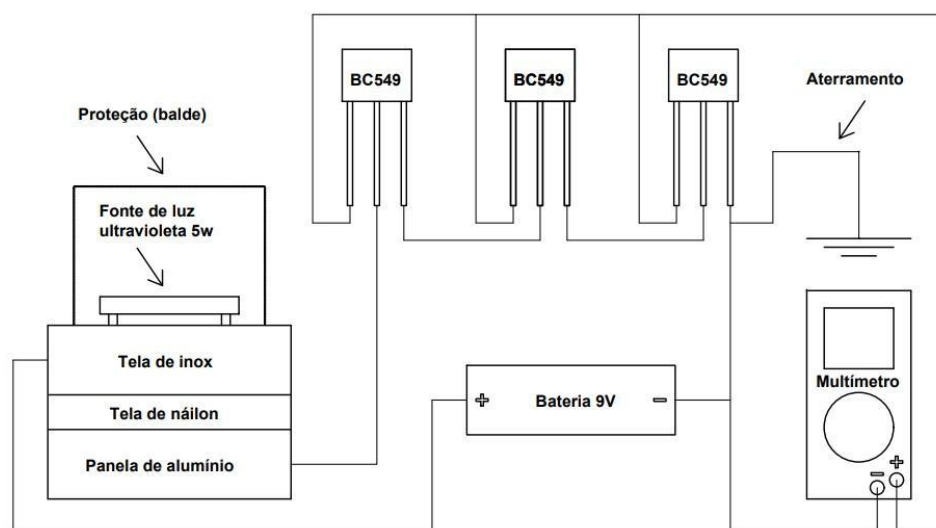
Figura 3 – Transistor NPN BC549



Elaborado pelo autor, 2024

Cada transistor possui três terminais: uma base, um emissor e um coletor. E assim podem ser encontrados a base, o emissor e o coletor de cada transistor que será utilizado na montagem do experimento através do uso da Figura 3, logo acima. Então, identificados os terminais de cada transistor, será possível estabelecer a conexão em série entre eles na placa *protoboard* através do uso da Figura 4, logo abaixo. Na verdade, a maneira para montar não apenas essa conexão em série entre os transistores, mas para montar todo o circuito fotoelétrico pretendido, estando no uso da Figura 4 como referência.

Figura 4 – Esquema do circuito montado



Elaborado pelo autor, 2024

Figura 4: utilizar os oito fios de estabelecer conexões na placa *proto-board* para conectar o emissor do primeiro transistor (aquele mais à esquerda de quem observa a Figura 4) à base do segundo, e o emissor do segundo à base do terceiro. Após isso, ligar todos os coletores a um mesmo cabo o qual então sai da placa *proto-board* e chega ao positivo do multímetro. A base do primeiro transistor conectar por cabo à panela de alumínio. Conectar o emissor do terceiro transistor a três cabos simultaneamente: um em direção ao negativo do multímetro; outro conectar ao polo negativo da bateria de 9 V; o terceiro para realizar aterramento. Por fim, conectar o positivo da pilha à tela de inox com utilização de um cabo. Posteriormente a montagem do circuito, posicionar a lâmpada de aquário sobre a célula fotoemissiva (montada com a tela de inox, a tela de náilon e a panela de alumínio), colocando um balde em cima da lâmpada antes dessa ser ligada, porque é muito importante levar a sério medidas de proteção que impeçam a interação de raios ultravioletas com os olhos e pele, mesmo se tratando de uma potência de 5 W.

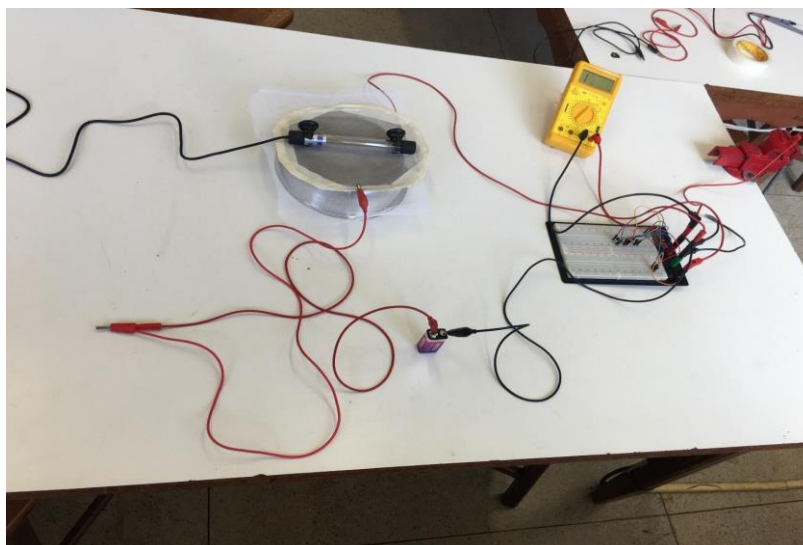
E também anteriormente ao ligar da lâmpada, posicionar o multímetro para medir na escala de 20 M $\Omega$ : devido ao baixo valor de corrente elétrica que deverá percorrer o circuito montado, mesmo com o aumento da ordem de dez milhões de vezes ( $10^7$ ) proporcionado pelos transistores, necessitar-se-ia de um multímetro mais sofisticado e assim mais sensível na medição de corrente elétrica, e logo mais caro, pouco provável de ser encontrado em laboratórios de escolas públicas do ensino médio. Portanto a corrente fotoelétrica pode ser obtida indiretamente através da medição direta da resistência elétrica, a qual será acusada em megaohm (M $\Omega$ ) pelo multímetro durante o funcionamento do circuito. Após achar o valor da corrente do circuito de modo pois indireto, descontando-se a influência de amplificação dos transistores, pode assim se encontrar um valor aproximado para a ordem de corrente fotoelétrica real então gerada no experimento.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo o passo a passo exposto na metodologia, o circuito fotoemissivo, então construído, consiste-se de uma panela de alumínio, da tela de aço inox retirada de uma peneira de cozinha, e de um pedaço obtido de uma tela de náilon. A tela de náilon tem que estar entre a panela e a tela de inox, como já informado anteriormente. As telas sendo necessárias porque são estruturas que permitem a passagem de luz, para assim fótons poderem atingir a superfície de alumínio da panela, ejetando elétrons que tendem a movimentar da panela para a tela de aço inox. E a tela de náilon é colocada no meio para isolar as partes metálicas (as placas não podem estar em contato para então o saltar de elétrons, o que caracteriza o efeito fotoemissivo), caso contrário o circuito é danificado, os transistores queimam. Por duas vezes isso ocorreu durante os testes: a tela de inox retirada da peneira ficou com alguns “fiapos” metálicos na borda, e mesmo passando fita crepe, um desses fiapos passou pela tela de *nylon*, estabelecendo contato com a panela de alumínio.

Sugere-se a utilização do multímetro, na função que testa se há continuidade entre duas partes, para verificar se realmente as duas estruturas metálicas estão isoladas entre si (evitando assim danificar os transistores), essa verificação é interessante, portanto, antes de serem iniciados os testes. Outro procedimento importante para se realizar antes de testar é polir a panela de alumínio com palha de aço a seco, utilizamos palha de aço, e limpar bem, removendo os resíduos em pó restados na superfície da panela; para isso utilizamos guardanapos secos.

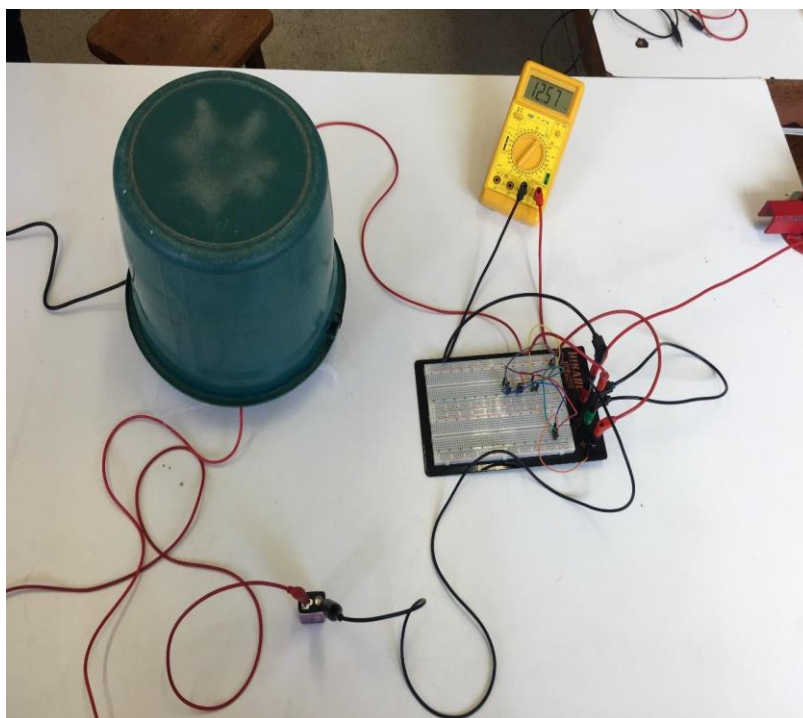
Figura 5 – Circuito montado com a fonte de radiação ultravioleta desligada



Elaborado pelo autor, 2024

Na Figura 5, à direita do observador, percebe-se uma morsa (estrutura metálica vermelha presa na borda da mesa), e que serviu para aterramento do circuito fotoemissivo. Nessa imagem, podemos perceber então o circuito fotoelétrico montado rigorosamente de acordo com o esquema apresentado na Figura 4.

Figura 6 – Luz ultravioleta ligada gerando corrente fotoelétrica



Elaborado pelo autor, 2024

A diferença da Figura 5 (célula fotoemissiva sem funcionar) para a Figura 6 (célula fotoemissiva funcionando) sendo a utilização de um balde que esconde a fonte de radiação ultravioleta: é muito importante levar a sério medidas de proteção que impeçam a interação de raios ultravioletas com os olhos ou pele, mesmo se tratando de uma potência de 5 W. Em FILHO, SALAMI e HILLEBRAND (2006), artigo base para esse trabalho, foi utilizada uma lâmpada de 400 W: sem dúvida reproduzir o experimento com uma fonte luminosa de 5 W representa um ganho significativo em termos de maiores facilidade e segurança para a aplicação em sala de aula no Ensino Médio, além da utilização maior em relação a materiais acessíveis para a construção do circuito fotoelétrico do tipo fotoemissivo.

Na figura 6, pode ser visto o multímetro marcando um valor de resistência igual a 12,57 M $\Omega$ , e considerando uma tensão de 9 V, a corrente elétrica que está percorrendo o circuito é da ordem de  $10^{-7}$ , isso com uma amplificação da ordem de  $10^7$  realizada pelos três transistores em série, assim, a corrente fotoelétrica gerada devido à ejeção de elétrons da panela de alumínio

sendo da ordem de  $10^{-14}$ , porém, somente esse valor de ampere, já representa uma taxa de  $6,25 \cdot 10^4$  (sessenta e dois mil e quinhentos) elétrons por segundo, isso significa que, mesmo a corrente fotoelétrica do experimento sendo muito baixa, por volta de sessenta mil elétrons por segundo foram ejetados da placa de alumínio.

Anteriormente ao realizarmos o aterramento, houve algumas interferências com o multímetro acusando alguns valores mesmo com a lâmpada ultravioleta desligada. Isso indica que a conexão da bateria de 9 V no circuito já sendo suficiente para promover tensão entre as placas que, nessa distância, permitem alguns elétrons saltarem de uma para outra.

O aterramento, com a luz ultravioleta desligada, favorece uma medição de resistência infinita no multímetro: não sendo na realidade uma resistência infinita, e sim muitíssimo elevada, pois elétrons, mesmo poucos, atravessam a distância entre as placas, mesmo, consoante dito, com a lâmpada desligada; é uma questão que envolve a possibilidade de medição do multímetro utilizado, pois ele não percebe esse valor de corrente passando por ele, assim, em sua marcação, pode-se dizer que a corrente tendeu a zero. Como resistência sendo a razão entre tensão por corrente, a corrente tender a zero significa uma resistência então considerada infinita.

Ainda nesta parte de resultados e discussões, algumas sugestões didáticas possíveis de serem exploradas com o experimento: realizar o experimento com outros materiais além do alumínio e observar o valor da resistência medida; discutir sobre o tempo para o multímetro acusar medida de resistência, o que é quase instantâneo, porque ou o fóton possui energia maior que a função trabalho do metal, ou não; experimentar diferentes distâncias para a lâmpada em relação à placa e às telas (em relação assim à célula fotoemissiva construída), com intuito de verificar o comportamento da marcação no multímetro utilizado, discutindo-se o que ocorre com a diminuição gradual da intensidade da fonte luminosa então utilizada.

Para concluir esse capítulo, uma última sugestão, com intuito de tornar o replicar experimental do circuito fotoelétrico, nesse trabalho realizado, ainda mais acessível em termos econômicos: os cabos de jacaré utilizados no experimento foram obtidos no laboratório de Física do IFMG *Campus* Bambuí, porém, caso o professor de ensino básico não possua acesso a tais cabos, há no mercado cabos do tipo jacaré bem mais baratos, *jumpers* macho/macho e conectores clip com rabicho para a bateria de 9 V, que podem tornar o circuito mais simples em comparação com nossa execução experimental.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste trabalho foram integralmente cumpridos: a construção de uma célula fotoemissiva bem como de um sistema amplificador de corrente, conectados por um circuito montado com o objetivo de se estimar a corrente fotoelétrica indiretamente, a partir da medição direta da resistência do circuito, utilizando-se de um multímetro capaz de medir a resistência elétrica na faixa de 20 M $\Omega$ .

Um ponto importante a destacar é o êxito obtido por este trabalho em reproduzir o experimento, em comparação com à experimentação do artigo base, em termos da utilização de materiais mais acessíveis, bem como o fato da redução da potência da fonte de irradiação ultravioleta utilizada, de 400 W para somente 5 W, o que representa um ganho imenso em questão de facilidade na obtenção dessa fonte, além da maior segurança, devido a uma menor periculosidade, durante então a aplicação do experimento em salas de aula do ensino médio.

Como proposta para trabalhos futuros, sugerimos pesquisas e desenvolvimento em trabalhos com intuito de construir um protótipo do experimento do efeito fotoelétrico aqui realizado, reproduzindo-o em menor escala, portátil, e assim com uma maior facilidade de transporte para a sala de aula.

## REFERÊNCIAS

- EBERHARDT, Dario, et. al. Experimentação no ensino de física moderna: efeito fotoelétrico com lâmpada néon e LEDs. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 3, p. 928-950, dez. 2017.
- FERREIRA, Telmo Alves de Camargo. **Efeito fotoelétrico: uma abordagem experimental para a Licenciatura em Física**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- FILHO, João Bernardes da Rocha; SALAMI, Marcos Alfredo; HILLEBRAND, Vicente. Construção e caracterização de uma célula fotoelétrica para fins didáticos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 555-561, 2006.
- NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. Monografia (Pós-Graduação em Fontes alternativas de energia) – Departamento de Engenharia – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- REIS, Mari Aurora Favero. **Efeito fotoelétrico na produção e transformação de luz: Investigação do uso de uma proposta didática para o ensino de física em cursos de engenharia**. 2019. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Matemática) – Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2019.
- SILVA, Luciene Fernanda da. ASSIS, Alice. Física moderna no ensino médio: um experimento para abordar efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 313-324, ago. 2012.
- SILVA, R. S. DA; ERROBIDART, N. C. G. Sobre as pesquisas relacionadas ao ensino do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro do ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 618–639, dez. 2015.
- SOUSA, Djalma Gomes de. **Oficina de física moderna experimental: confecção e aplicação de um produto educacional relacionado ao efeito fotoelétrico para alunos do ensino médio**. **Caderno de Física da UEMS**, v. 18, n. 1, p. 1202.1-11, 2020.