

UMA PROPOSTA DE ENSINO INVESTIGATIVO SOBRE A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA: O EFEITO FOTOELÉTRICO

Marcello Ferreira¹

Universidade de Brasília – UnB – Brasil
marcellof@unb.br

Olavo Leopoldino da Silva Filho²

Universidade de Brasília – UnB – Brasil
olavolsf@unb.br

Alessandro Pinto Freitas³

Universidade de Brasília – UnB – Brasil
prof.alefreitas@gmail.com

Renato Lourenço⁴

Universidade de Brasília – UnB – Brasil
renato.xf@hotmail.com

Michel Lourenço⁵

Universidade de Brasília – UnB – Brasil
michelmbll@hotmail.com

¹Doutor em Educação em Ciências pela UFRGS. Professor do Instituto de Física e do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UnB.

²Doutor em Física pela UnB. Professor do Instituto de Física e do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da UnB.

³Mestrando em Ensino de Física na UnB. Professor de Física da Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal (SEDF).

⁴Mestrando em Ensino de Física na UnB. Professor de Física da Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal (SEDF).

⁵Mestrando em Ensino de Física na UnB. Professor de Física da Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal (SEDF).

RESUMO: O presente trabalho teve por objetivo apresentar um material didático que permitisse tratar da Física Moderna e Contemporânea, em especial o efeito fotoelétrico, de modo contextualizado no cotidiano do aluno. O público alvo foi uma turma do 3º ano de Ensino Médio, turno noturno, na Região Administrativa do Gama, administrado pela Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal. As aulas foram elaboradas com base nos Três Momentos Pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994) – problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento –, aqui denominados: 1ª fase – situações do cotidiano de conhecimento diário dos alunos; 2ª fase – exposição dos conhecimentos necessários para a compreensão dos temas estudados e da problematização inicial; e 3ª fase – abordagem sistemática do conhecimento incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram seu estudo quanto outras que, embora não estejam diretamente ligadas ao momento inicial, possam ser compreendidas pelo mesmo conhecimento. Após a coleta de dados, foi possível constatar que o material elaborado experimentalmente em sala de aula instigou os alunos, qualificando a aprendizagem e a curiosidade. Assim, mostra-se evidente a necessidade de aplicabilidade da FMC ao cotidiano, de modo a facilitar sua abordagem. Espera-se que o material aqui produzido sirva de modelo para professores de Física.

Palavras-chave: Física Moderna e Contemporânea. Efeito fotoelétrico. Três Momentos Pedagógicos. Ensino de Física.

ABSTRACT: The present paper aims at presenting a didactic material that allowed to deal with the Modern and Contemporary Physics, in particular the photoelectric effect, in a contextualized way in the daily life of the student. The target audience was a the third year high school group of the night shift, in the Administrative Region of Gama, administered by the Department of Education of the Federal District in Brazil. The classes were prepared based on the Three Pedagogical Moments of Delizoicov and Angotti (1994) - initial problematization, organization of knowledge and application of knowledge, here denominated: 1st phase - situations of the students' daily knowledge; 2nd phase – exposition of the knowledge necessary to understand the subjects and the studied initial problematization; and 3rd phase - systematic approach of the knowledge incorporated by the student to analyze and interpret both the initial situations that determined the study and others that, although not directly linked to the initial moment, can be understood by the same knowledge. After the data collection, it was possible to verify that the material elaborated experimentally in the classroom instigated the students qualifying the learning and the curiosity. Thus, the need to apply FMC to everyday life is evident, in order

to facilitate its use as a learning tool. It is hoped that the material produced here can serve as a model for teachers of Physics.

Keywords: Modern and Contemporary Physics. Photoelectric Effect. Three Pedagogical Moments. Physics Teaching.

1 INTRODUÇÃO

A Física tem por norte pesquisar muitos fenômenos e suas causas que se desdobram em aplicações em várias áreas, tais como: indústria, guerra, Medicina, Engenharia, isto é, desde as reações nucleares em cadeia, que ocorrem nos reatores nucleares e nas bombas, até o funcionamento de *lasers* e fibras óticas utilizadas em telecomunicações, passando por dispositivos semicondutores e circuitos integrados para a eletrônica.

O engajamento desta área científica no cotidiano social é algo muito importante. Destarte, muitos alunos não sabem a exata explicação de determinados fenômenos, principalmente quando estes estão relacionados com a Física Moderna e Contemporânea (FMC). Um exemplo desse tipo de lacuna é a aplicação dos conceitos e relações conceituais relativas ao Efeito Fotoelétrico (EF) para a explicação do acender e apagar das luzes dos postes em função da luminosidade do meio.

De fato, é possível uma análise de tal fenômeno nas mais diversas ações cotidianas, a saber: impressão a *laser*, dispositivos automáticos (portas eletrônicas e torneiras automáticas), controle remoto etc. E, ainda, é possível fazer menção aos novos aparelhos de *laser* utilizados na Medicina para a correção de defeitos da visão, retirada de tatuagem, remoção de pedras nos rins, tratamento de queimaduras, entre outros procedimentos.

Na transição do século XX para o século XXI, tanto a ciência como a tecnologia têm superado barreiras antes sequer imaginadas. Muitas descobertas e invenções trouxeram para o cotidiano aparelhos e equipamentos que encurtaram distâncias e expandiram os limites do conhecimento e da imaginação, acarretando em um paradoxo que disputa a atenção dos jovens com milhares de outros atrativos, apesar de o ensino de algumas disciplinas parecer estagnado.

A FMC possui um contexto histórico muito interessante. No ano de 1887, H. Hertz¹ realizou uma série de experimentos com os quais demonstrou a existência das ondas eletromagnéticas, ao observar que a energia eletromagnética capturada pelo sistema era utilizada para produzir a faísca nas pontas do receptor. Fazendo uso de vários obstáculos colocados entre as pontas dos aparelhos (papelão, vidro e quartzo, por exemplo), ele observou que o vidro,

¹Heinrich Rudolph Hertz (1857-1894), físico alemão.

diferentemente do quartzo, afetava a distância máxima, concluindo, corretamente, que o efeito se dava pela incidência, nas pontas do receptor, de luz ultravioleta produzida na descarga do transmissor. Tal fenômeno é conhecido como efeito fotoelétrico²: a luz ultravioleta (ou radiações mais energéticas como raios X e raios gama) incidindo em um metal faz com que elétrons sejam ejetados da superfície metálica.

Já no início do século XX, precisamente no ano de 1905, Albert Einstein, fazendo uso, de forma mais geral, das ideias de Planck³ para a energia dos osciladores na cavidade do corpo negro, logrou explicar as propriedades observadas no efeito fotoelétrico. Planck, em sua demonstração, se restringiu à quantização da energia para o caso dos osciladores (elétrons) nas paredes da cavidade. As ondas no interior da cavidade (produzidas pelos elétrons oscilando) eram quantizadas em decorrência disso. Einstein, então, a partir das exigências interpretativas do fenômeno, considerou que a *origem* da quantização da energia decorreria de uma constituição *corpuscular* dos raios luminosos, cada um portando uma quantidade fixa de energia que era transmitida praticamente de forma instantânea aos elétrons da placa na forma de choques. Os fenômenos usuais não permitiam observar tal característica devido ao grande número de fótons normalmente associado à energia radiante (assim como um líquido aparenta ser um fluido contínuo e não formado por elementos discretos).

Aqui, faz-se importante perceber que antes da descoberta da difração da luz, Newton⁴ desenvolveu um modelo corpuscular para a luz que, no entanto, não corresponde às ideias de Einstein, principalmente porque seu modelo não previa a difração da luz (fenômeno tipicamente ondulatório)⁵. Para explicar a difração e a interferência, Einstein supôs que as partículas de luz (fótons) não se moviam como partículas usuais, mas que se propagavam com intensidades médias dadas pela amplitude da onda eletromagnética associada, dada pelo modelo ondulatório. O caráter corpuscular seria manifestado apenas no processo de interação da radiação eletromagnética com a matéria (na emissão e absorção), quando a troca de energia se daria, segundo este modelo, por meio de colisões.

² A. Einstein, *Annalen der Physik* (Leipzig) (1905).

³ Karl Ernst Ludwig Max Planck (1858-1947), físico alemão.

⁴ Sir Isaac Newton (1642-1727), matemático, físico e filósofo inglês.

⁵ De fato, o interesse, à época, de Newton era explicar o fenômeno da polarização, que também resistia à explicação ondulatória (não se imaginavam as ondas eletromagnéticas como sendo transversais). Assim, Newton propôs um modelo de “corpúsculo de luz” em que tais corpúsculos apresentavam anisotropia estrutural que *seria* responsável pela polarização. Entretanto, este deve ser considerado apenas um modelo genérico, do qual se *vislumbra* a possibilidade de compreensão do fenômeno da polarização. Newton jamais formalizou esta explicação a partir das considerações dos corpúsculos de luz.

Seguindo as ideias de Planck, Einstein associou à radiação de frequência ν fótons de energia $E = h\nu$. A intensidade de luz passou a ser dada, então, pelo número de fótons emitidos por unidade de tempo. Supôs-se também que no efeito fotoelétrico um único fóton interage com um elétron, sendo completamente absorvido por este, que, após a interação, terá uma energia cinética $E = h\nu$. Após receber tal energia pela interação com o fóton, o elétron deve ainda perder alguma energia até escapar da superfície do metal. Assim, a energia cinética do elétron ejetado do metal se dá conforme a equação 1, vide figura 1:

Equação 1 - Equação característica do efeito fotoelétrico

$$K = E - \phi = h\nu - \phi \quad (1)$$

Em que:

K = energia cinética;

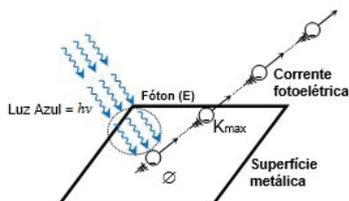
E = energia do fóton;

ϕ = função trabalho realizado para arrancar o elétron do metal;

h = constante de Planck; e

ν = frequência da radiação.

Figura 1 – Exemplo de Efeito fotoelétrico com incidência de luz Azul



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

Com este conjunto de hipóteses, Einstein explicou o fenômeno do efeito fotoelétrico conforme Figura 1, até então não entendido na Física Moderna, apontando um comportamento de dualidade onda-partícula para os fótons; isto é, hora se comportam como onda eletromagnética ao viajar no espaço, ora se comportam como partícula no momento de colisão.

A estruturação das aulas teve como base os três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994), quais sejam: 1) Problematização inicial; 2) Organização do conhecimento; e, 3) Aplicação do conhecimento. Quando da proposta da problematização inicial, apresentou-se um vídeo gravado pelos próprios autores com o título “acender dos postes”⁶, mostrando o acender e o apagar das luzes dos postes; por conseguinte, o conceito de quantização de energia e fóton – a demonstração experimental (Relé fotoelétrico); posteriormente, uma série de discussões das questões/situações-problemas. Neste sentido, o

⁶ Disponível em <https://youtu.be/gDHLPSuz1rE>.

objetivo nesta fase inicial foi despertar o interesse dos alunos, fazendo com que eles formulem diferentes respostas e hipóteses da situação.

Para a coleta de dados, propôs-se um questionário com as questões problemas, contendo cinco questões com as seguintes abordagens: 1) Sobre painéis solares; 2) Sobre o funcionamento das luzes de iluminação pública; 3) Tipos de sensores de movimento no uso cotidiano; 4) Portas automáticas encontradas nas portas de shopping, torneiras e portas de elevadores, que se acionam ao se aproximar e se afastar delas; e 5) Descrever sobre o que sabe sobre o Efeito Fotoelétrico.

Diante do exposto, é preciso salientar o fato de ser comum encontrar alunos com a ideia de que estudar Física é algo difícil, chegando a afirmar que nunca farão uso daquele conhecimento adquirido em sala de aula. Assim, é possível questionar o motivo pelo qual não entendem a Física, cabendo aos docentes da área melhorar os métodos utilizados em sala de aula, tendo em vista que, em alguns momentos, podem parecer ultrapassados.

Neste ínterim, a presente pesquisa investigativa buscou as respostas para o seguinte questionamento: que potencialidades as práticas relacionadas ao cotidiano do aluno podem trazer de ganho para o ensino e a aprendizagem da Física? É em vista da discussão deste problema que propomos a presente pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica deste estudo, relativamente ao ensino, teve por base a obra Metodologia do Ensino de Ciências, de Delizoicov e Angotti (1994), que apresenta uma proposta das concepções de educação de Paulo Freire denominadas “Três Momentos Pedagógicos”, assim caracterizados: 1) Problematização inicial; 2) Organização do conhecimento; e 3) Aplicação do conhecimento.

Freire trata da pedagogia libertadora, das concepções de problematização e do processo de tal problematização. Já Delizeicov e Angotti (1994) destacam que toda atividade educacional pode ser aplicada nos três momentos pedagógicos supramencionados.

Sobre a teoria de Paulo Freire (1988), ela é progressista e se enquadra em uma tendência pedagógica libertadora, uma vez que tem por escopo a libertação do oprimido, que, por sua vez, libertaria o opressor. E, ainda, possui dois pilares, quais sejam: 1) Autonomia – para dar consciência ao educando de si e do mundo; e 2) Liberdade – para libertar o aluno, o oprimido, daquilo que o oprime. Neste sentido, aquele autor considera a educação como uma ferramenta social de libertação.

Diante das mazelas da sociedade em que estava inserido, Freire (1988) desenvolveu um método de alfabetização libertador conhecido como método Paulo Freire. Embora tivesse sido muito elogiado e seu método utilizado em muitos países da África e das Américas, incluindo até mesmo países desenvolvidos, no Brasil ele foi inicialmente marginalizado porque suas proposições foram entabuladas na época da ditadura – ocasião em que o Estado dispensava forte resistência ao comunismo. Por outro lado, seu método também era criticado porque defendia a tomada de consciência por parte dos educandos, além da liberdade e a autonomia destes, opondo-se aos ideais políticos que lhe eram contemporâneos.

Nesta esteira, Freire (1977) defendeu uma metodologia de alfabetização como meio de dar consciência aos analfabetos oprimidos – motivo pelo qual se pautou principalmente na classe operária. E, com efeito, ao defender seu método, faz uma reflexão sobre a educação bancária – transmissão do conhecimento sem qualquer reflexão; isto é, o educador simplesmente faz depósitos de conhecimento na mente dos alunos, que apenas acumulam informações, memorizando-as, sem reflexão; e tal ação maximiza a opressão, tolhendo a criticidade dos educandos, ao passo que satisfaz os interesses dos opressores, fazendo a condição de opressor o sonho do oprimido. Infelizmente, ainda é possível observar na estrutura educacional vigente os fundamentos da educação bancária.

Freire (2006) também discute o currículo, por criticar a adoção (imposição) de um currículo único e defender a liberdade de cada região brasileira em criar o seu próprio, tendo em vista as grandes diferenças regionais de uma nação continental. De fato, a realidade do aluno está diretamente associada à compreensão, sendo que, para este, o conteúdo ensinado tem que fazer sentido. Isto quer dizer, a título de exemplo, que não faz muito sentido para um aluno estar envolto à temática “quatro estações do ano” em lugares em que, de fato, somente existem duas; ou, ainda, fazer uso de palavras desconhecidas em uma região por conta das condições ali existentes, como, por exemplo, a palavra “pulôver”⁷ em locais como Belém do Pará, em que o clima é tipicamente quente.

Para Freire (1988), a consciência crítica (criticidade) e a dialogicidade são condições *sine qua non* para a libertação. Igualmente, o diálogo deve ter início na busca do conteúdo programático, que deve ser concebido em uma ótica do educador com o educando (MOREIRA, 2017).

Assim, para um ensino dialógico, Freire (2006) defende o uso de temas geradores, isto é, uma abordagem temática que possibilite ao aluno romper dog-

⁷ Espécie de suéter sem mangas que se veste sobre a camisa.

mas durante sua formação, construído horizontalmente com os estudantes. A escolha dos temas geradores deve estar intrinsecamente ligada à realidade social e regional do aluno, fazendo-lhe sentido, tornando-se, de fato, uma prática libertadora.

Freire (1988) se refere aos temas como objetos de estudo de compreensão no processo educativo, sendo que, na perspectiva epistemológica aqui adotada, constituem-se como objetos de conhecimento. O aspecto mais significativo da proposta educacional outrora apresentada é a proposição quanto ao currículo escolar: a estruturação das atividades educativas, incluindo a seleção de conteúdos que devem constar na programação das disciplinas, bem como sua abordagem sistematizada nas salas de aula, rompe com o tradicional paradigma curricular, cujo princípio estruturante é a conceituação científica, isto é, um currículo concebido com base em uma abordagem conceitual (DELIZOICOV, 2018).

Delizoicov e Angotti (1994) associam a redução temática da proposta freiriana à proposta curricular a ser desenvolvida pelo professor e, neste sentido, destacam os temas interligando o conhecimento do professor e do aluno. Aqueles autores destacam os grandes eixos balizadores nessa abordagem de ensino: o conhecimento que se quer tornar disponível, as situações significativas envolvidas nos temas e sua relação com a realidade imediata em que o aluno está inserido e os fatores ligados diretamente à aprendizagem – o tema gerador⁸ é uma forma de articular as três dimensões.

Freire (1988) assevera que o educador, no momento de problematização, deve fazer os alunos entenderem ou mesmo compreender a relação com os temas, isto é, na fase inicial a problematização seja acessada pelo professor.

Conforme exposto anteriormente, Freire (1988) propõe um processo em três momentos ou fases para estruturar a dinâmica em sala de aula, quais sejam: 1) Codificação; 2) Problematização; e 3) Decodificação, constituindo, assim, uma síntese das dimensões dialógica e problematizadora, que moldam o ato de educar. Com base em um código representando qualquer dos múltiplos canais de comunicação e das situações envolvidas nos temas, tal processo deve ser planejado de modo que sejam exploradas a dimensão dialógica do ato educativo e a dimensão problematizadora do ato do conhecimento. Neste ínterim, pretende-se lograr:

- a) A apreensão pelo educador do significado que o sujeito-aluno atribui às situações, logo que o aluno é imerso a uma interpretação da sua

⁸ São idealizados como um objeto de estudo que compreende o fazer e o pensar, o agir e o refletir, a teoria e a prática, pressupondo um estudo da realidade em que emerge uma rede de relações entre situações significativas individual, social e histórica, assim como uma rede de relações que orienta a discussão, interpretação e representação dessa realidade.

vida cotidiana, ao passo que possa ser problematizado sistematicamente;

- b) A apreensão pelo aluno, via problematização, fazendo se envolver explicitamente à formulação de problemas que devem ser enfrentados por meio da interpretação originada de conhecimentos científicos – introduzida pelo professor no processo de problematização e previamente planejada e estruturada em unidades de ensino; e
- c) A manifestação do educando, que seria o conhecimento inicial, refletindo, assim, seu nível de consciência sobre a situação apresentada inicialmente.

Os três processos apresentados por Paulo Freire têm como meta proporcionar subsídios para o enfrentamento e a superação desse nível de consciência, o que envolve rupturas. É precisamente nesse aspecto que a cultura elaborada, associada a essa dinâmica didático-pedagógica, tem um papel a desempenhar.

Parece claro que, se as rupturas outrora mencionadas são referentes à consciência dos alunos, elas também apontam para aquelas que necessitam ocorrer no sistema educacional, nos mais diversificados níveis de atuação. Em outros termos, a ação educativa revela-se como um processo que, rompendo com práticas educativas já estabelecidas historicamente, vai promovendo as transformações necessárias (DELIZOICOV, 2008).

Na hipótese do ensino de Física sob o viés freireano, o professor, juntamente com os alunos, pode escolher um tema gerador que norteará determinado conteúdo. Neste sentido, a escolha dos temas geradores tem início com a investigação – oportunidade de levantamento dos possíveis temas geradores, com base em critérios regionais e culturais, que se relacionem com a realidade do aluno. Em seguida, tem-se a tematização – momento em que novos temas geradores relacionáveis podem surgir. E, por último, tem-se a problematização – o aluno se conscientiza, e aquele conceito se torna um objeto de luta, de liberdade, por parte dos aprendizes. Por exemplo, poder-se-ia escolher, para determinada região do País, o tema gerador “geração de energia elétrica”. Talvez, a região em comento possua uma usina hidrelétrica, um lago para tal finalidade, ou até mesmo alguma escassez de energia. Neste ínterim, com base nesse tema gerador, poder-se-ia trabalhar com o conceito de energia mecânica, hidrostática, hidrodinâmica etc. No caso em tela, o conteúdo a ser trabalhado faria mais sentido para o aluno, despertando-lhe maior criticidade e permitindo-lhe o diálogo, a prática dialógica.

Delizoicov (2005) propõe o problema como gênese do conhecimento de Bachelard (1996), e a problematização da atividade docente, proposta por Freire

(1988). Em Bachelard, é preciso observar as atribuições para a compreensão, em que o conhecimento tem as origens, ou melhor, buscando uma melhor solução para problemas consistentemente formulados.

Antes de tudo o mais, é preciso saber formular problemas. E seja o que for que digam, na vida científica, os problemas não se apresentam por si mesmos. É precisamente esse sentido do problema que dá a característica do genuíno espírito científico. Para um espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma questão. Se não houve questão, não pode haver conhecimento científico. Nada ocorre por si mesmo. Nada é dado. Tudo é construído (BACHELARD, 1977, p. 148).

Com base em Paulo Freire, tomando o problema como eixo estruturador da atividade docente, Delizoicov (2005) busca a exploração didática de temas significativos que envolvam contradições sociais e que proporcionem uma renovação dos conteúdos programáticos escolares em uma dimensão crítica. Daí o objetivo geral da presente pesquisa: discutir as potencialidades da problematização do cotidiano do aluno, a partir de fatos relacionados à FMC, em especial, o EF, com base em determinados experimentos e vídeos do fenômeno, analisando e discutindo as potencialidades e até mesmo as dificuldades com os alunos.

3 METODOLOGIA

O material didático proposto na presente pesquisa foi aplicado no Centro de Ensino Médio (CEM), na Região Administrativa do Gama (RA II), administrado pela Secretaria de Estado de Educação do Distrito Federal (SEE/DF), em uma turma do 3º ano do Ensino Médio, turno noturno. As fotos e filmagens da atividade experimental foram obtidas com uma câmera digital modelo WB-100, Samsung®.

O produto educacional foi aplicado ao longo de cinco aulas com duração de 45 minutos. As aulas foram elaboradas com base nos Três Momentos Pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994), a saber: 1) Problematização inicial; 2) Organização do conhecimento; e, 3) Aplicação do conhecimento, aqui denominados 1ª fase, 2ª fase e 3ª fase, respectivamente.

Castro (1976), afirma que a sequência didática é equivalente a um curso em miniatura. O autor defende a adoção da sequência didática por acreditar que “a aprendizagem por unidades atende às necessidades dos estudantes de maneira mais efetiva”.

As unidades didáticas “apesar de que seguidamente se apresentem em classe de modo separado, têm mais potencialidade de uso e de compreensão

quanto mais relacionadas estejam entre si”, é importante dizer que a ação tem por condição de aplicação que o professor integre/conecte os conteúdos aos conhecimentos fragmentados de forma clara e, assim, possa “integrar conteúdos teoricamente isolados ou específicos para incrementar seu valor formativo” (ZABALA, 1998, p.139).

Podemos afirmar que as unidades isoladas geram um melhor aprendizado ao permitir uma progressão na introdução de conceitos que favorece uma maior compreensão do tema pelos estudantes, diminuindo, assim, o esforço necessário por parte do professor para integrar os modelos e conceitos. Desta forma, em uma sequência didática bem estruturada, podem-se organizar temas de conteúdos mais simples e fundamentais antecedendo os temas mais complexos para que haja realmente uma sucessão lógica dos conteúdos, de modo a facilitar o entendimento do aluno. Além disso, essa sequência estruturada pode fornecer um encadeamento de grandes temas correlatos, evidenciando a ligação que existe entre as grandes áreas de uma disciplina ou até mesmo, numa perspectiva mais ampla, de disciplinas diferentes.

Assim apresentou-se um material didático experimental relacionado à busca da compreensão do que leva ao acender e apagar das luzes dos postes de iluminação pública – relé fotoelétrico. Buscou-se propiciar aos alunos o aprimoramento do conhecimento sobre as diferentes formas de análise das contribuições do efeito fotoelétrico no cotidiano, usando a estratégia da abordagem experimental (relé fotoelétrico). A atividade teve como intuito oportunizar aos alunos observar, na prática experimental, os processos do efeito fotoelétrico, bem como a metodologia física e, em geral, científica subjacente à prática, a fim de que possam compreender a aplicação da análise do fenômeno.

Para inserir adequadamente o aluno na atividade experimental, foi necessário introduzi-lo nos conceitos de quantização de energia, fóton e onda eletromagnética, apresentados de forma simples, para que o objeto de estudo tivesse seus objetivos alcançados.

Pretendeu-se alcançar, ao término da aplicação do material didático, a aquisição, por parte do aluno, do conhecimento necessário sobre o tema “efeito fotoelétrico”, de modo que este constitua, no decorrer das aulas, capacidade crítica para analisar o fenômeno em diferentes contextos do cotidiano. Assim, desmistificou-se o ensino de Física para o aluno, conforme afirmam Carvalho et al (2010, p. 176):

A Física é, de longa data, uma das disciplinas mais temidas pelos alunos do Ensino Médio. Grande parte dessa fama deve-se ao fato de que seu ensino tradicionalmente vem sendo pautado na transmissão de conceitos e fórmulas cujas relações com a realidade parecem inexistentes.

É sabido que o ensino de Física vem se ajustando de diferentes modos e, neste sentido, faz-se importante algum distanciamento dos métodos tradicionais, que utilizam a estratégia da apresentação de conteúdos e a resolução de exercícios, resultando em alunos desmotivados e com pouco apreço pelo ensino da disciplina em questão.

De fato, é preciso motivar os professores da atualidade no que tange ao modo tradicional de ensino, buscando a inovação nas aulas. Uma alternativa nessa direção são as atividades experimentais de baixo custo, isto é, aquelas que não necessitam de agendamento em laboratório, fazendo com que os alunos saiam da pura dimensão da abstração, e sejam direcionados para uma análise dos fenômenos físicos que despertam curiosidades e, conseqüentemente, despertam também o interesse na investigação científica: a relação teoria-experimento-realidade. Grande parte dos professores realiza atividades experimentais sem fazer, contudo, uma reflexão da visão de ciência ali embutida (AZEVEDO et al, 2009).

Para a realização da presente investigação, dispôs-se do conhecimento com base no referencial teórico outrora apresentado, isto é, os três momentos pedagógicos de Paulo Freire, cada um com sua função específica e diferenciada, aqui denominados 1ª, 2ª e 3ª fases, respectivamente.

Na 1ª fase foram trabalhadas as situações do cotidiano de conhecimento diário dos alunos. Assim, eles foram desafiados a expor o que pensam sobre tais situações, para que o professor pudesse ir vislumbrando seu conhecimento prévio. De início, deu-se a apresentação de um vídeo em que se tem o acender e o apagar das luzes dos postes da iluminação pública na cidade de Brasília, Distrito Federal. Esperou-se, então, que os alunos pensassem se tal ação realmente ocorreu de maneira automática ou se algum indivíduo liga e desliga todos os dias as luzes em questão, uma vez que nunca se abordaram estas situações a partir de elementos de Física Moderna (FM) e tampouco o EF.

A finalidade do desafio apresentado foi fazer o aluno pensar sobre a própria interpretação das situações propostas, ao ponto de desenvolver sua habilidade de criticar suas próprias perspectivas, e também a fim de iniciar uma discussão, instigando este aluno a perceber a necessidade da obtenção de novos conhecimentos para o entendimento da situação, agora com os conceitos físicos antes desconhecidos.

Por conseguinte, aguçaram-se explicações contraditórias e localizaram-se as possíveis limitações do conhecimento existente, quando este é confrontado com o conhecimento científico adequado ao fenômeno. Assim, no que tange ao material didático utilizado (material suplementar), é preciso que o aluno de-

tenha, de antemão, o conceito de quantização de energia, isto é, que entenda e conheça o que é um fóton de energia.

Delizoicov e Angotti (1994, p. 54) recomendam que a postura de educador deva voltar-se mais para “o questionamento e lançamento de dúvidas sobre o assunto, para que assim possamos responder e explicar os fenômenos científicos”. Neste sentido, apresentaram-se para os alunos vídeos interessantes sobre o fenômeno aqui proposto, de modo que tivessem a curiosidade de entender a Física e desenvolvessem o interesse pela disciplina.

A principal ação na problematização inicial foi apenas observar o que os estudantes sabiam e pensavam sobre o EF, se pelo menos ouviram alguma coisa sobre o tema, tendo em vista que a FM nunca lhes foi introduzida como conteúdo. Aqui, o professor organizou a discussão não para fornecer explicações prontas, mas sim para buscar o questionamento das interpretações apresentadas pelos estudantes. É importante recordar que, na forma como foi concebida, na problematização inicial nos momentos pedagógicos também se fazem presentes os conceitos iniciais, não importando se espontâneos ou não; isto é, os estudantes podem explicitar sua concepção científica acerca das questões desafiadoras que lhes são apresentadas.

A problematização inicial na situação de estudo em questão tem a função de significar as linguagens, que se desdobrarão em uma discussão conceitual. Assim, faz-se importante saber e conhecer os conceitos científicos centrais sobre os quais é preciso trabalhar e introduzir os termos necessários nos momentos propícios.

Na 2ª fase, o professor expôs os conhecimentos necessários para a compreensão dos temas e da problematização inicial estudados. É parte do produto (material suplementar) apresentar o conteúdo de modo claro e objetivo em aula expositiva e dialogada, isto é, no modelo tradicional. Aqui, os conhecimentos necessários para a compreensão do tema e da problematização inicial foram sistematicamente estudados sob orientação do professor.

Em relação ao núcleo do conteúdo específico de cada tópico, Delizoicov e Angotti (1994) afirmam que este deve ser preparado e desenvolvido durante o número de aulas necessárias em função dos objetivos definidos e do livro didático ou outro recurso pelo qual o professor tenha optado para seu curso, sendo ressaltados pontos importantes e sugeridas atividades com as quais se poderão trabalhar para organizar a aprendizagem.

Do ponto de vista metodológico, para o desenvolvimento de tal ação, o professor é aconselhado a fazer uso das mais diversas atividades, tais como: exposição, formulação de questões, texto para discussões, trabalho extraclasse, revisão e destaque dos aspectos fundamentais, além de experiências.

No momento da atividade pedagógica é importante enfatizar que os conhecimentos científicos são o ponto de chegada, quer da estruturação do conteúdo programático, quer da aprendizagem dos alunos, ficando o ponto de partida com os temas e as situações significativas que originam, de um lado, a seleção e organização do rol de conteúdo, ao serem articulados com a estrutura do conhecimento científico, e de outro, o início do processo dialógico e problematizador.

Para que os alunos compreendam cientificamente as situações problematizadas, o papel do professor na organização do conhecimento consiste no desenvolvimento de diversas atividades (a utilização de textos de divulgação científica, a produção escrita envolvendo a narrativa, a utilização das Tecnologias de Informação e Comunicação – TICs – e a dinâmica discursiva, por exemplo).

A 3ª fase destinou-se à abordagem sistemática do conhecimento incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram seu estudo, quanto outras que, embora não estejam diretamente ligadas ao momento inicial, possam ser compreendidas pelo mesmo conhecimento.

O papel do professor consiste no desenvolvimento de diversas atividades para capacitar os alunos a utilizarem os conhecimentos científicos explorados na organização do conhecimento, com a perspectiva de formá-los para articular constantemente a conceituação científica com situações que fazem parte de sua vivência. Aqui se tem a busca pela “generalização da conceituação”, isto é, a identificação e o emprego da conceituação científica envolvida, em que “é o potencial explicativo e conscientizador das teorias científicas que precisa ser explorado” (DELIZOICOV; ANGOTTI; PERNAMBUCO, 2018, p. 21).

O estudante tem a potencialidade de compreender cientificamente as situações tratadas na problematização inicial, motivo pelo qual, nesse terceiro momento, retomam-se as situações iniciais, que agora passam a ser entendidas a partir do olhar científico.

Ao apresentar tal momento pedagógico, Delizoicov e Angotti (1994, p. 55) asseveram que ele:

Destina-se, sobretudo, a abordar sistematicamente o conhecimento que vem sendo incorporado pelo aluno, para analisar e interpretar tanto as situações iniciais que determinaram o seu estudo, como outras situações que não estejam diretamente ligadas ao motivo inicial, mas que são explicadas pelo mesmo conhecimento.

Assim, pretende-se que, “dinâmica e evolutivamente”, o aluno perceba que o conhecimento, além de ser uma construção historicamente determinada, está

acessível para qualquer cidadão e, por isso, deve ser apreendido, para que se possa fazer uso dele; isto é, “pode-se evitar a excessiva dicotomização entre processo e produto, Ciência de ‘quadro-negro’ e Ciência da ‘vida’” (DELIZOICOV; ANGOTTI, 1994, p. 55).

Entre as características da dinâmica dos Três Momentos Pedagógicos está a apresentação dos assuntos não como fatos a memorizar, mas como problemas a serem resolvidos, propostos a partir da experiência de vida dos educandos, para serem trabalhados. Ao problematizar uma situação particular adotando uma estratégia dialógica, os conceitos são integrados à vida e ao pensamento do educando. Em vez da memorização de informações sobre Química, Física ou Biologia, ocorre o enfrentamento dos problemas vivenciados.

Em síntese, o movimento da problematização contido nos Momentos supra-mencionados pode possibilitar que os educandos se tornem críticos das próprias experiências, interpretando suas vidas, e não apenas passando por elas.

A sequência de ensino investigativa aqui empreendida⁹ foi organizada com base em um conjunto coerente de atividades investigativas, tais como: vídeos, laboratório aberto em sala de aula, demonstração investigativa, textos históricos, problemas e questões abertas, recursos tecnológicos etc., abrangendo os três eixos estruturantes da alfabetização científica. Cada uma das atividades investigativas tem início com um problema que, quando de sua resolução, os alunos tinham condições de levantar hipóteses e, ao testá-las, argumentarem, evidenciando a estrutura de seus pensamentos.

Aqui, a questão relevante foi o estudo da aprendizagem dos alunos, dividido em problemas menores. Como se trata de uma proposta de sequência didática, faz-se importante destacar que não se tem um conjunto de conteúdo fixo a ser ensinado no decorrer da sequência. O direcionamento dado em cada momento, não somente na sistematização dos conteúdos abordados, mas também da problematização, deve ser adaptável à realidade dos alunos.

Para a aplicação do material didático, somente foi possível fazê-lo às terças e quintas-feiras. Portanto, o período das aulas foi compreendido entre 03 a 17 de outubro de 2018. A partir da primeira aula, as três fases foram aplicadas em todos os dias, e a única aula em que não foram utilizadas as três fases consecutivas foi a última, destinada à avaliação final, correspondendo, assim, apenas à 3ª fase.

No Quadro 1, tem-se um resumo das atividades desenvolvidas no decorrer das cinco aulas.

⁹ Esta elaboração foi realizada no âmbito da disciplina de Processos e Sequências de Ensino e Aprendizagem em Física no Ensino Médio, ofertada no 2º semestre de 2018 no curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Universidade de Brasília (UnB).

Para a atividade experimental, buscou-se o menor custo possível para a montagem do experimento do relé fotoelétrico – que reproduz o funcionamento da iluminação pública dos postes – no Ensino Médio.

O objetivo principal foi facilitar o entendimento do assunto a ser abordado, e auxiliar o professor para que, ao ler o material, tenha novas ideias para uso em sala de aula, auxiliando na introdução e no aprofundamento do conceito de FMC em uma perspectiva contextualizada.

Quadro 01 – Plano de Aula com a utilização da visita técnica como recurso pedagógico

Data	Aulas	Fases	Atividades	Tempo
03/10/2018	Aula 01	1ª	<p>1. Abertura da aula (5 minutos): apresentação da técnica de ensino dos Três Momentos Pedagógicos pelo professor com foco nos objetivos e funcionamento.</p> <p>2. Vídeo do acender a apagar das luzes dos postes, com o conteúdo programático para leitura.</p> <p>3. Conceito de quantização de energia e fóton, que orientarão as discussões realizadas pelos alunos, como, por exemplo: o comportamento dual da luz: discutir as principais definições das ondas eletromagnéticas; definir o que é fóton; discutir qual a importância de verificar quais são os comportamentos da luz; quais princípios devem ser observados pelo aluno no que tange o Efeito Fotoelétrico. Com o material didático disponibilizado pelo professor; destacar os pontos mais importantes discutidos em sala de aula; verificar quais tópicos deveriam ter sido discutidos, mas não foram.</p> <p>4. Demonstração experimental (relé fotoelétrico), como modelo exato do funcionamento das luzes dos postes, propiciando assim discussão das questões-problemas.</p>	45 min.
		2ª	<p>1. Discussões sobre as questões que envolvem a atividade experimental: Instigar os alunos a falarem sobre as questões, de forma que a discussão seja atrativa. O professor, nesta fase, apenas media as discussões da problematização sugerida ou até mesmo de outras aplicações cotidianas que irão surgindo naturalmente ao longo das aulas.</p>	
		3ª	<p>1. A proposta dessa atividade é verificar o que os alunos sabem sobre essa área de conhecimento e instigar sua curiosidade sem nenhuma finalidade avaliativa.</p>	

Data	Aulas	Fases	Atividades	Tempo
05/10/2018	Aula 02	1ª	<p>1. Descrição dos fatos históricos relevantes: menção a Maxwell e às ondas eletromagnéticas.</p> <p>2. A primeira evidencia do EF no experimento realizado por Hertz na tentativa de provar as ondas eletromagnéticas de Maxwell.</p> <p>3. Discutindo que foi verificado em seus experimentos, que uma placa metálica neutra adquire carga positiva quando atingida por luz ultravioleta.</p>	45 min.
		2ª	<p>1. Discussão sobre a verdadeira descoberta do EF por Lenard ao estudar os raios catódicos.</p> <p>2. Explanar sobre a hipótese do gatilho e a criação das leis empíricas, destacando que esta explicação foi a mais aceita até 1911, mesmo depois da hipótese de Einstein em 1905.</p> <p>3. Argumentar que a física clássica não fornecia alicerces teórico para explicar os seus resultados experimentais.</p>	
		3ª	<p>1. Neste último momento, relatar sobre a explicação do fenômeno dada por Einstein inspirada na quantização proposta por Planck.</p> <p>2. Elencar o quanto foi importante as contribuições dadas por Einstein, em que o mesmo recebeu o prêmio Nobel pelos seus trabalhos conclusivos a respeito do EF, destacando que não foi fácil a aceitação da explicação de Einstein, elencando as tentativas refutadas de Millikan, que acabaram por corroborar de forma definitiva a hipótese de Einstein.</p>	
10/10/2018	Aula 03	1ª	<p>1. Conceituar o fenômeno EF.</p> <p>2. Explanar sobre a quantização da luz.</p>	45 min.
		2ª	<p>1. Explicar como a frequência e a intensidade da luz influenciam a emissão de elétrons de uma superfície metálica.</p>	
		3ª	<p>1. Apresentar a função trabalho e relatar que existe um certo valor para cada tipo de material, explicando que cada um necessita de uma energia mínima para que os elétrons sejam ejetados, e apresentar a equação do EF.</p>	

Data	Aulas	Fases	Atividades	Tempo
12/10/2018	Aula 04	1ª	1. Apresentar algumas aplicações tecnológicas do EF e discutir seu funcionamento.	45 min.
		2ª	1. Medida da resistência do sensor (LDR) com o multímetro com variação da luz incidente e explicação do seu funcionamento.	
		3ª	1. Demonstração de uma atividade experimental sobre Led LDR relacionando com a explicação do EF e com aplicação tecnológica desse fenômeno.	
17/10/2018	Aula 05	1ª	Não se fez necessário.	45 min.
		2ª	Não se fez necessário.	
		3ª	1. Ao final da implementação da sequência didática, aplicar o questionário avaliativo, que permitirá ao professor diagnosticar se houve apropriação do conhecimento pelos alunos, sobre o tema discutido.	

Fonte: Quadro elaborado pelos autores, 2018.

Como objetivos específicos, o presente estudo teve por destaque: a) A construção de um material didático que aborde o efeito fotoelétrico (material suplementar); B) O auxílio na abordagem do ensino do efeito fotoelétrico; e, C) a contribuição na aprendizagem do aluno. Os materiais necessários para a montagem do experimento estão listados no Quadro 02, a seguir. Estes foram adquiridos em loja de componentes eletrônicos em Brasília no mês de outubro de 2018.

Quadro 02 – Custo de materiais para atividade experimental

Material	Custo em outubro de 2018 (em R\$)
1 relé fotoelétrico	13,00
1 base do relé fotoelétrico	8,00
1 trilho de conectores sindal para fios de 4 mm	8,00
1m Fio encapado vermelho 2,5 mm	4,00
1m Fio encapado preto 2,5 mm	4,00
1m Fio encapado branco 2,5 mm	4,00
1 bocal de lâmpada	3,40
1 lâmpada	3,80
1 caixa de tomada completa	8,50
1 plug tomado macho	0,50
Total	57,20

Fonte: Quadro elaborado pelos autores, 2018.

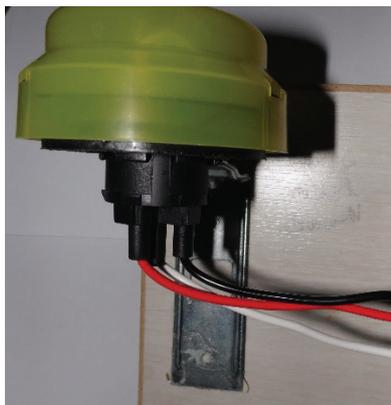
Para a montagem do experimento, fez-se uso de um alicate, cortando os fios no tamanho desejado. O circuito foi montado com fios flexíveis e com conectores sindal afixados sobre uma placa de Medium Density Fiberboard (MDF). O circuito poderia ter sido montado conectando os fios diretamente uns nos

outros, isolando-os com fita, mas, com o intuito de evitar acidentes, optou-se por usar os conectores. Além do mais, o trabalho torna-se mais prático com os conectores.

Os componentes foram fixados na placa MDF fazendo uso da cola TEK Bond, para, quando de seu manuseio, os componentes não se desprenderem.

Um passo importante nesta construção é certificar-se que os fios do relé fotoelétrico sejam conectados corretamente. Este é um dispositivo com três fios em sua saída, devendo ser conectado em uma base própria, onde estão os três fios de saída, geralmente nas cores preto, vermelho e branco (vide figura 2).

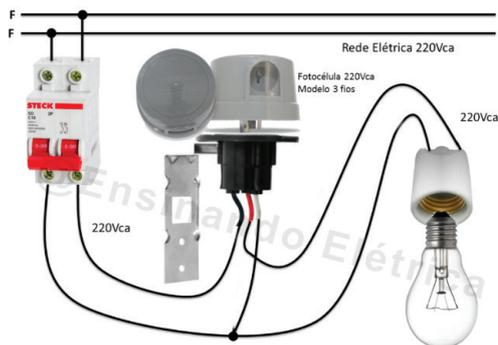
Figura 2 – Relé fotoelétrico com a base acoplada



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

A montagem do circuito em uma rede de tensão de 220 volts é dada conforme a figura 3, que evidencia o modelo esquemático completo do funcionamento do modelo presente nos postes de eletricidade.

Figura 3 – Relé fotoelétrico montado a rede 220 volts



Fonte: Ensinando Elétrica, 2017. Figura adaptada pelos autores.

Em seguida, fez-se dois modelos esquemáticos do modelo de circuito elétrico ligado a uma lâmpada e exposto em sala de aula, conforme evidenciado nas Figuras 4a e 4b.

Figura 14a – Relé fotoelétrico ligado a uma lâmpada



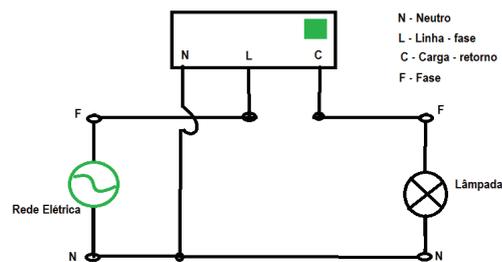
Figura 14b – Relé fotoelétrico ligado a uma lâmpada, montado em uma caixa de contatora elétrica



Fonte: Figuras elaboradas pelos autores, 2018.

Após a montagem do circuito elétrico, ligou-se na tomada, isto é, na rede elétrica, sendo percebido que a lâmpada não acendeu (vide Figura 5).

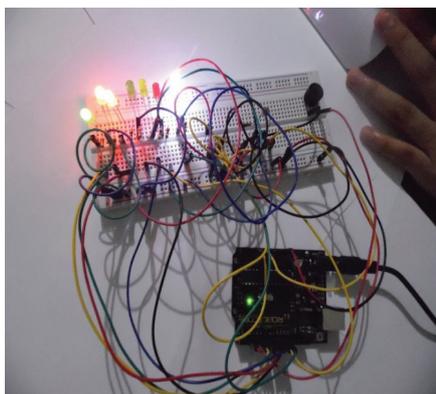
Figura 5 – Circuito elétrico relé fotoelétrico e lâmpada.



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

Na busca por simular as portas automáticas dos Shopping, fez-se um modelo esquemático do modelo circuito elétrico em uma placa protoboard com o uso de placa Arduino, conhecido como “Projeto Alarme Multipropósito” exposto em sala de aula, conforme evidenciado na Figura 6.

Figura 6 – Alarme Multipropósito



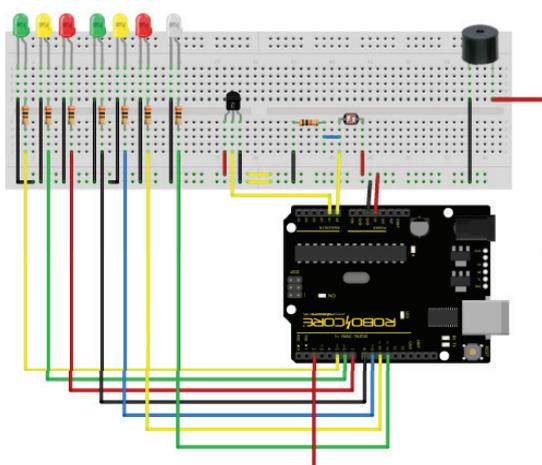
Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

Para a montagem deste experimento utilizamos alguns equipamentos eletrônicos, a saber: 02x Led Verde / 02x Led Amarelo / 02x Led Vermelho / 01x Led de Alto Brilho / 01x Buzzer 5V / 07x Resistor 300Ω / 01x Resistor 10kΩ / 01x LM35 / 01x LDR / cabos diversos.

Neste experimento do alarme multipropósito, se a temperatura estiver alta os três Leds deverão acender. Se os três Leds correspondentes à luminosidade estiverem apagados – indicando uma falta total de luminosidade no ambiente - um alarme deverá soar e um led de alto brilho irá acender.

A idéia de montagem deste experimento está disponível aos que adquirirem o produto de iniciantes para robótica, conforme figura 7.

Figura 7 - Alarme Multipropósito em Arduino



Fonte: Robocore kit iniciante V7.3 para arduino.

Em seguida, posicionou-se a mão em frente ao sensor fotoelétrico, simulando a noite, conforme evidenciado na figura 8, quando então a lâmpada acendeu.

Figura 8 – Simulando a noite, pondo a mão em frente ao sensor fotoelétrico.



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

Em seguida, fizeram-se uso de alguns *lasers* de cores variadas no escuro, atingindo o sensor fotoelétrico, a fim de observar o que ocorre com a lâmpada. Com isso foi possível abordar o conceito de fóton, conforme evidenciado na figura 9, a seguir.

Figura 9 – Energia de diferentes frequências atingindo uma placa de metal



Fonte: Figura elaborada pelos autores, 2018.

4 ANÁLISE DE DADOS

Os dados foram analisados tomando por base a aplicação do produto “Relé fotoelétrico”, o questionário com as questões problemas e um questionário avaliativo aplicado no último dia de aula – requisito parcial de avaliação para a disciplina de Física.

A turma do turno noturno contava com um total de 32 alunos matriculados regularmente e que participaram assiduamente dos cinco dias de aplicação do material proposto. Assim, foi possível analisar todas as três fases em sua totalidade até sua finalização.

A estruturação das aulas teve como base os três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994), quais sejam: 1) Problematização inicial; 2) Organização do conhecimento; e, 3) Aplicação do conhecimento. Quando da proposta da problematização inicial, apresentou-se um vídeo gravado pelos próprios autores com o título acender dos postes¹⁰, mostrando o acender e o apagar das luzes dos postes; introduziu-se o conceito de quantização de energia e fó-

¹⁰ Disponível em <https://youtu.be/gDHLPSuzrE>.

ton – a demonstração experimental (Relé fotoelétrico); posteriormente, foi feita uma série de discussões das questões/situações-problemas. Neste sentido, o objetivo nesta fase inicial foi despertar o interesse dos alunos, fazendo com que ele formule diferentes respostas e hipóteses da situação.

Por fim, relataram-se a história e o conceito do EF proposto por Albert Einstein. De fato, trabalhar os conceitos de EF por meio de aplicações no cotidiano do aluno proporciona as seguintes habilidades: a) Desenvolvimento da capacidade de observação crítica; b) Aprimoramento da capacidade de trabalhar em equipe; c) Incitação a um comportamento mais autônomo dos alunos em relação à figura do professor; d) Aprofundamento da discussão de um tema proposto; e e) EF, mediante participação ativa dos alunos.

Para a coleta de dados, propôs-se um questionário envolvendo as questões problemas, contendo cinco questões com as seguintes abordagens: 1) Sobre painéis solares; 2) Sobre o funcionamento das luzes de iluminação pública; 3) Tipos de sensores de movimento no uso cotidiano; 4) Portas automáticas encontradas nas portas de shopping, torneiras e portas de elevadores, em que se acionam ao se aproximar e se afastar delas; e 5) Escrever o que sabe sobre o EF.

No 1º dia de aula, apresentou-se o conceito de quantização e energia e fóton, uma vez que os alunos nada conheciam sobre o tema “Física Moderna e Contemporânea”. Assim, foi preciso deixar os alunos livres para o levantamento de hipóteses sobre o relé fotoelétrico. Neste sentido, segundo Deliozicov e Angonti (1994), a função do professor na problematização inicial é instigar a discussão entre os alunos, lançando dúvidas e questionamentos sobre a temática, sem fornecer nenhuma explicação.

A seguir foi apresentado o questionário com as questões problemas, conforme Quadro 3:

Quadro 03 - Questionário com as questões problemas

Universidade de Brasília - UnB
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF
Professores: Alessandro Freitas/ Renato Lourenço/ Michel Lourenço
Aluno (a): _____ Idade: _____
Questões-Problemas
1. Com a discussão sobre a produção de energia limpa no mundo, alguns lugares têm usado a energia, especificamente a elétrica, gerada a partir da luz solar. Nesse caso, são usados painéis solares. Explique, da sua maneira, como é produzida a energia elétrica nesse caso.
R:
2. Você já deve ter reparado que as luzes dos postes, ao anoitecer, acendem sozinhas. Explique como isso acontece.
R:
3. Alguns locais, como lojas, residências e prédios fazem uso de sensores de movimento como alarme de segurança. Como esses dispositivos funcionam?
R:
4. É muito comum encontrarmos aparatos que abrem e fecham automaticamente, como o caso de portas de shopping, torneiras e portas de elevadores. Neles há um dispositivo que aciona a abertura ou fechamento. Você sabe que dispositivo é esse? Como ele funciona?
R:
5. Escreva o que você sabe sobre o efeito fotoelétrico.
R:

Fonte: Quadro elaborado pelos autores, 2018.

Durante a análise do questionário com as questões problemas, foi possível observar vários tipos de respostas. Para a questão 1, por exemplo, os alunos afirmaram que o processo em que o painel solar recebe a luz do sol sofre algum tipo de conversão ou transformação em energia elétrica. Para a questão 2, deu-se o que já se imaginava em sua aplicação, isto é, os alunos afirmaram que as luzes se acendem por conta de algum tipo de programação feita pela administração pública ou mesmo que a Companhia Energética de Brasília (CEB) possui um botão de liga e desliga das luzes dos postes. É claro que

alguns dos alunos se aproximaram da resposta quando da afirmação da existência de um tipo de sensor que detecta tanto o anoitecer como o amanhecer, porém, sem apontar qual tipo de sensor.

As questões iniciais tiveram um papel importante para o início efetivo da aplicação do produto. No que tange à questão 3, os alunos, em sua maioria, apresentaram respostas que se aproximaram da resposta correta, com erros apenas nos termos corretos, a saber: os sensores captam o calor do corpo humano; os objetos são programados para obter, a cada movimento do corpo, o calor; detector de temperatura do corpo, e assim por diante.

No caso da questão 4, por ser um tanto parecida com a questão 3, grande parte dos alunos fizeram a mesma relação da questão anterior, isto é, a temperatura do corpo; porém, nenhum deles chegou a mencionar que o corpo emite radiação na frequência infravermelha. Alguns nem lograram responder à questão.

A questão 5, objeto de estudo do presente artigo, pediu para que os alunos mencionassem o que sabiam sobre o EF. Assim, do total de 32 alunos, 17 afirmaram que não sabiam ou não teriam ouvido falar sobre o EF. E para a surpresa do presente estudo, três alunos acertaram a resposta: os elétrons são liberados de um material metálico por uma radiação.

Após a coleta de dados sobre o que os alunos sabiam sobre o EF, as questões permitiram problematizar a discussão sobre o fenômeno físico, evidenciando que o sensor funcionava devido à captação da variação de luz.

Dando prosseguimento às fases de aplicação do produto, a segunda fase consistiu na organização do conhecimento. Apresentou-se aqui a história do EF, seus conceitos, suas características e suas aplicações. As aulas foram elaboradas no modelo expositivo e dialogado, de modo que todo o material utilizado (vídeos, slides e apostilas) foi ministrado. Sobre a questão, Delizoicov e Angotti (1994) afirmam que o professor deve desenvolver amplamente os conteúdos de Física sempre de modo conexo com a problematização inicial apresentada, sendo possível empregá-la aplicando atividades diversas.

É importante destacar que durante a aplicação do experimento do Relê fotoelétrico, a curiosidade dos alunos foi intensa, pois logo queriam saber o motivo de tal fenômeno desligar e acender as luzes somente tirando e pondo as mãos em frente ao sensor fotoelétrico, de modo a simular o amanhecer e o anoitecer.

Na terceira fase, que corresponde à aplicação do conhecimento, todos os 32 alunos se fizeram presentes, sendo aplicado um questionário avaliativo, conforme Quadro 4, com sete questões, entre as quais, duas questões de vestibular.

lares e três questões iguais ao questionário apresentado na primeira aula, que possibilitou a análise de aprendizado do aluno, uma vez que já se aproximava a prova do Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) do ano corrente. A seguir, tem-se o Gráfico 1, que descreve os resultados do questionário avaliativo com índice de erros e acertos.

Quadro 4 - Questionário avaliativo

Universidade de Brasília - UnB Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - MNPEF Professores: Alessandro Freitas/ Renato Lourenço/ Michel Lourenço Aluno (a): _____ Idade: _____ <p style="text-align: center;">Questionário avaliativo</p> <p>1. O efeito fotoelétrico pode ser explicado a partir das suposições de Einstein de que:</p> <p>a) A energia da luz cresce com a velocidade; b) A energia da luz é quantizada; (Resposta correta) c) A massa do elétron cresce com a velocidade; d) A carga do elétron cresce com a velocidade; e) Átomos irradiam energia;</p> <p>2. (UFPA-99) A emissão de fotoelétrons por determinado metal exige que a luz incidente tenha:</p> <p>a) Uma frequência maior que um determinado valor (Resposta correta) b) Intensidade superior a um valor determinado c) Velocidade, em que o comprimento de onda e sua frequência sejam corresponsáveis dessa emissão. d) Um comprimento de onda superior a um determinado valor e) Uma frequência e intensidade menor que um determinado valor.</p> <p>3. Após inúmeras sugestões e debates, o ano 2005 foi declarado pela ONU o "Ano Mundial da Física". Um dos objetivos dessa designação é comemorar o centenário da publicação dos trabalhos de Albert Einstein, que o projetaram como físico no cenário internacional da época e, posteriormente, trouxeram-lhe fama e reconhecimento. Um dos artigos de Einstein publicado em 1905 era sobre o efeito fotoelétrico, que foi o principal motivo da sua conquista do Prêmio Nobel em 1921. A descrição de Einstein para o efeito fotoelétrico tem origem na quantização da energia proposta por Planck em 1900, o qual considerou a energia eletromagnética irradiada por um corpo negro de forma descontínua, em porções que foram chamadas quanta de energia ou fótons. Einstein deu o passo seguinte admitindo que a energia eletromagnética também se propaga de forma descontínua e usou esta hipótese para descrever o efeito fotoelétrico. Em relação ao efeito fotoelétrico numa lâmina metálica, pode-se afirmar que:</p>
--

- I. A energia dos elétrons removidos da lâmina metálica pelos fótons não depende do tempo de exposição à luz incidente. (Resposta correta)
- II. A energia dos elétrons removidos aumenta com o aumento do comprimento de onda da luz incidente.
- III. Os fótons incidentes na lâmina metálica, para que removam elétrons da mesma, devem ter uma energia mínima. (Resposta correta)
- IV. A energia de cada elétron removido da lâmina metálica é igual à energia do fóton que o removeu.

Analisando as afirmativas, conclui-se que somente

- a) Está correta a afirmativa I.
- b) Está correta a afirmativa IV.
- c) Estão corretas as afirmativas I e III. (Resposta correta)
- d) Estão corretas as afirmativas II e IV.
- e) Estão corretas as afirmativas III e IV.

4. Com relação ao efeito fotoelétrico, afirma-se que:

- I - Qualquer que seja a frequência da luz incidente, é possível que sejam arrancados elétrons de um metal.
- II - Quando elétrons são arrancados de um metal, quanto maior a frequência da luz incidente, maior são as energias com que os elétrons abandonam o metal.
- III - Quanto maior a energia de um fóton, maior é o número de elétrons que ele pode arrancar de um metal.

Das afirmativas acima

- a) somente I é correta.
- b) somente II é correta. (Resposta correta)
- c) somente I e II são corretas.
- d) somente I e III são corretas.
- e) I, II e III são corretas.

5. Você já deve ter reparado que as luzes dos postes, ao anoitecer, acendem sozinhas. Explique como isso acontece.

R:

6. Alguns locais, como lojas, residências e prédios fazem uso de sensores de movimento como alarme de segurança. Como esses dispositivos funcionam?

R:

7. Escreva o que você sabe sobre o efeito fotoelétrico.

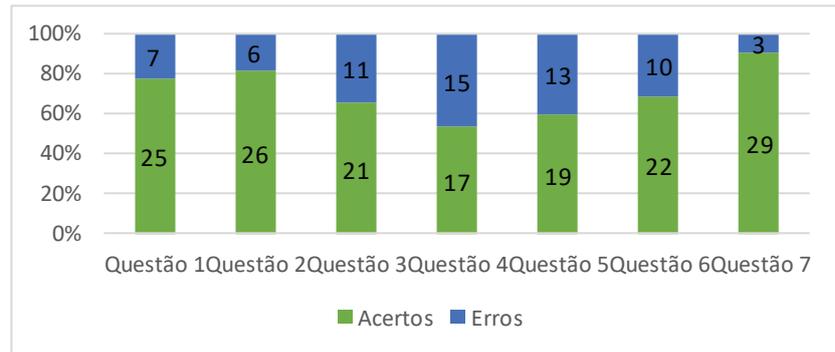
R:

8. Você considera que aulas com atividades práticas ou experimentais são:

- () Interessantes
- () Muito interessantes
- () Enfadonhas ou cansativas
- () Interessantes e despertam curiosidade
- () Pouco interessantes
- () outro. Especifique.

Fonte: Quadro elaborado pelos autores, 2018.

Gráfico 1 - Resultados do questionário avaliativo com índice de erros e acertos



Fonte: Gráfico elaborado pelos autores, 2018.

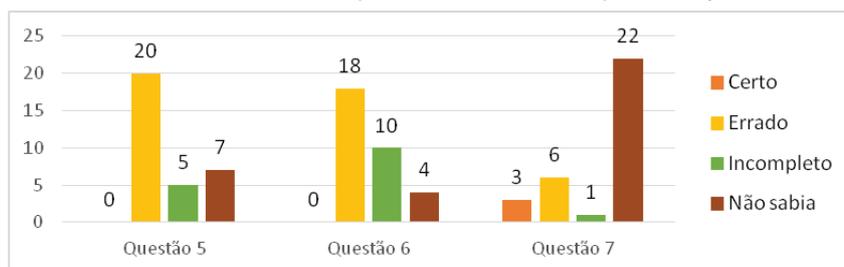
Com base no Gráfico 1, é possível observar que o nível de acertos foi satisfatório. Em média, os alunos tiveram 50% de acertos, sendo algo muito significativo. E entre as questões, havia duas que exigiram um pouco mais de atenção à leitura: questões 3 e 4. Aqui, talvez por ser um texto de análise ou muito extenso, grande parte dos alunos tenha se equivocado na resposta. No entanto, após os comentários do questionário avaliativo, alguns chegaram a afirmar que se confundiram no momento da marcação da alternativa correta, isto é, a alternativa C e B, no caso das questões 3 e 4, respectivamente.

Do ponto de vista do professor ou aplicador do produto em questão, ficou clara a necessidade de maior ênfase nas características do EF, quais sejam: a) Frequência de corte; b) Função trabalho; e c) Independência da luz. Do ponto de vista educacional, é possível perceber que o problema tem relação com o tempo de aulas necessárias para melhor abordagem do conteúdo.

As questões 5, 6 e 7 foram incluídas propositalmente, pois são as mesmas aplicadas nas questões problemas entregues na primeira fase do produto, permitindo analisar a qualificação ou mesmo a construção ou não do conhecimento referente ao EF.

A seguir, tem-se algumas comparações das questões impostas antes e após a implementação do produto educacional. Neste sentido, foi possível perceber um crescimento significativo em respostas corretas e potencialmente corretas, uma vez que alguns alunos não souberam fazer uso adequado do conceito. Mesmo assim, houve respostas incorretas. O Gráfico 2, a seguir, aponta o índice de respostas antes da implementação das questões problemas.

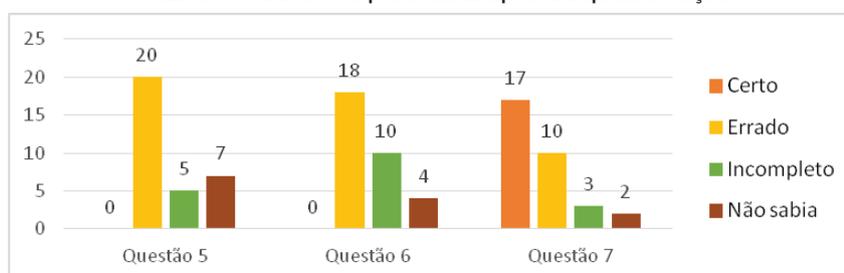
Gráfico 2 – Questões problemas antes da implementação



Fonte: Gráfico elaborado pelos autores, 2018.

Na coleta de dados foi possível perceber uma mudança drástica na escrita dos alunos no que tange aos termos científicos após a implementação. O Gráfico 3, a seguir, aponta o crescimento dos alunos ao final da implementação. Ali se tem que o número de respostas corretas ultrapassou em 50% aquele das questões corretas, isto é, um crescimento significativo e valoroso na análise em questão.

Gráfico 3 – Questões problemas após a implementação



Fonte: Gráfico elaborado pelos autores, 2018.

Na questão 7 do questionário avaliativo, referente ao que o aluno entende sobre o EF, em que antes somente um aluno acertou a resposta correta, o número de acertos ultrapassou os 53% do total de alunos, conforme o Gráfico 3. Diante do resultado obtido, pode-se considerar que a proposta foi alcançada, dadas as evidências de êxito na aplicação do produto.

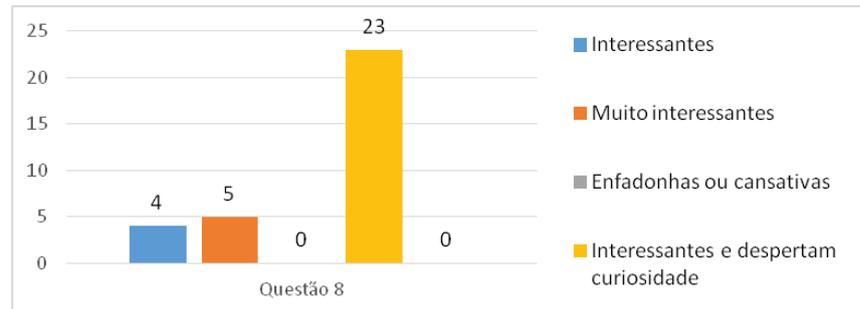
Em geral, os alunos lograram entender o funcionamento do Relé fotoelétrico, bem como o conceito que envolve o funcionamento do dispositivo que faz acender e apagar as luzes dos postes de iluminação pública.

O objetivo do questionário avaliativo foi fazer com que os alunos refletissem sobre o tema apresentado, estimulando-os em sua aprendizagem. Após a análise em questão, verificou-se que a sequência didática das aulas contribuiu significativamente ao aprendizado do EF – objeto do presente estudo.

É preciso destacar que, no questionário avaliativo, havia uma questão (8) que pedia a opinião dos alunos a respeito do uso de atividades experimentais, mesmo que fora do laboratório de Física, a saber: “Você considera que aulas com atividades práticas ou experimentais são: () Interessantes; () Muito interessantes; () Enfadonhas ou cansativas; () Interessantes e despertam

curiosidade; () Pouco interessantes; () outro. Especifique”. No Gráfico 4, a seguir, tem-se os dados referentes à pergunta investigativa em questão.

Gráfico 4 – Considerações dos alunos acerca de atividades experimentais



Fonte: Gráfico elaborado pelos autores, 2018.

Pelo Gráfico 4, foi possível perceber que 71,8% dos alunos consideraram a atividade experimental em sala de aula muito interessante para o despertar da curiosidade.

A partir dos dados coletados, verificou-se que a aplicação do produto educacional estimulou os alunos, despertando seu interesse no aprofundamento do conhecimento científico envolvido, no caso, o EF.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em um estudo científico realizado através das questões problemas, em especial a questão 5, os alunos confirmaram que nada sabiam sobre o tema “Efeito Fotoelétrico”, bem como sobre as características que facilitam a realização da investigação.

Assim, vale destacar algumas considerações: a) É possível que o produto educacional não seja igualmente efetivo em todos os segmentos do Ensino Médio – os educadores podem notar essa menor efetividade e creditar ao produto uma baixa resolubilidade, mesmo para os segmentos educacionais que dele poderiam se beneficiar; e, b) O interesse educacional dos professores em estimular o uso do produto para todos os alunos com um dado interesse, e não somente aos subgrupos investigados, acarretando um crescimento significativo de conhecimento científico.

A análise dos dados permitiu afirmar que a estimulação por atividade experimental levou ao crescimento e à curiosidade dos alunos. Assim, mostra-se evidente a necessidade de aplicabilidade da FMC ao cotidiano.

A implementação do material didático o “Relé fotoelétrico” tornou as aulas mais dinâmicas e atrativas, evidenciadas através do envolvimento e curiosi-

dade dos alunos em realizar os experimentos e verem o funcionamento, fazendo, de modo geral, o aluno conectar-se com o cotidiano vivenciado diariamente, relacionando conceitos físicos antes não conhecidos. Neste sentido, o professor como mediador torna a aula mais dialógica e participativa.

No âmbito educacional, fazer uso de experimentos para o ensino de FMC tornou-se viável, uma vez que, após a análise de dados, foi possível verificar que os resultados foram satisfatórios. No mais, ainda são poucos os materiais disponíveis para a execução de experimentos de baixo custo em sala de aula no que tange a FMC, pois, grande parte dos livros textos requer o uso de laboratório. Logo, cabe aos educadores criarem experimentos alternativos de baixo custo para estimular a curiosidade e atenção do aluno.

O experimento “Relé fotoelétrico” aqui apresentado pode ser utilizado em diferentes temas da Física, como, por exemplo, a eletricidade, no que tange o conceito de corrente e tensão elétrica, entre outras abordagens, cabendo ao professor verificar sua melhor aplicabilidade em sala de aula.

Durante a realização da experimentação, os alunos buscaram se aprofundar no conhecimento com o objetivo de conhecer o fenômeno físico envolvido, tendo em vista que para eles foi algo interessante, chamando-lhes a atenção.

A aplicabilidade do produto educacional relacionado ao EF foi totalmente fundamentada nos três momentos pedagógicos de Delizoicov e Angotti (1994), tornando o processo mais significativo. O planejamento da sequência didática foi elaborado cuidadosamente, de modo que as estratégias de ensino foram relacionadas ao tema, em que foi observado o que os alunos conheciam inicialmente sobre o objeto de estudo ao ser apresentado o vídeo. A proposta realizada de acordo com o referencial teórico é um processo gradativo dos conceitos físicos, aproximando o aluno ao cotidiano de vivência.

Diante do exposto, o presente estudo mostrou-se eficaz no que tange ser uma estratégia educacional viável de abordagem do EF. Mas, mesmo com resultados apontados como satisfatórios, muitos são os elementos a serem aprimorados, na busca de um melhor aproveitamento. Para tanto, o professor deve direcionar corretamente o produto à realidade vivenciada no cotidiano dos alunos.

Assim, espera-se que o produto educacional sirva aos professores de Física do Ensino Médio para o ensino de FMC, em especial, à temática EF, e que a sequência didática possa ser estendida a abordagens e propostas sobre novos temas a serem implementadas nas escolas de Ensino Médio, por meio das quais o aluno possa pensar, a partir de agora, por exemplo em energia limpa, ou ainda, em economia de energia, através do uso painéis solares.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, H. L. et al. O uso do experimento no ensino da Física: Tendências a partir do levantamento dos artigos em periódicos da área no Brasil. In: Encontro Nacional de Pesquisas em Educação em Ciências, 7, 2009, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis: Abrapec, 2009. p. 1-12. Disponível em: <http://posgrad.fae.ufmg.br/posgrad/viiienpec/pdfs/1067.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- BACHELARD, G. **A formação do espírito científico**: contribuição para uma psicanálise do conhecimento. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- _____. **O racionalismo aplicado**. Rio de Janeiro: Zahar, 1977.
- CASTRO, A. D. E. A. **Didática para a escola de 1º e 2º graus**. São Paulo: Pioneira, 1976.
- CARUSO, F., OGURI, V. **Física Moderna**: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.
- CARVALHO, A. M. P. et al. **Ensino de Física**. São Paulo: Cengage Learning; 2010. (Coleção Ideias em Ação).
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A. **Metodologia do Ensino de ciências**. 2. ed. São Paulo: Cortez, 1994.
- _____. Problemas e problematizações. In: PIETROCOLA, M. (Org.). **Ensino de Física**: Conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. p.125-150.
- _____. La educacion en ciencias y la perspectiva de Paulo Freire. **Alexandria**, Florianópolis, v. 1, p. 37-62, 2008.
- _____.; ANGOTTI, J. A.; PERMAMUCO, M. M. **Ensino de Ciências**: fundamentos e métodos. 5. ed. São Paulo: Ed. Cortez, 2018.
- ENSINANDO ELÉTRICA. **Como ligar fotocélulas 220v e 127v**. 2017. Disponível em: <https://ensinandoeletrica.blogspot.com/2017/02/ligarfotocelulas.html>. Acesso em: 06 dez. 2018.
- FREIRE, P. **Extensão ou comunicação?** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1977.
- _____. **Pedagogia do Oprimido**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1988. 184p.

_____. **Educação como prática da liberdade.** Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2006.

KNIGHT, R. **Física 4:** uma abordagem estratégica. Tradução de Clóvis Belbute Peres e Ana Rita de Avila Belbute Peres. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

MOREIRA, M. A. **Teorias de Aprendizagem.** São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 2017.

ZABALA, A. **A prática educativa:** como ensinar. Porto Alegre: Artmed, 1998

O EFEITO FOTOELÉTRICO

Conteúdo

A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA: O EFEITO FOTOELÉTRICO

Introdução	346
A interpretação vista de forma clássica	349
O potencial de corte	350
Os limites da interpretação clássica	352
A explicação de Einstein	353

A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA: O EFEITO FOTOELÉTRICO

Introdução

As linhas a seguir tiveram por norte propiciar uma compreensão da quantização da energia para a luz e para a matéria, visando tratar do EF em termos de quanta de luz, bem como utilizar o conceito de fóton. Foram utilizados como fonte de pesquisa Knight (2009) e Caruso (2016), que nortearam a descrição.

Faz-se importante o conhecimento histórico dos fatos que levaram ao descobrimento do EF no ano de 1886. Neste sentido, Heinrich Hertz foi o primeiro a demonstrar que ondas eletromagnéticas podem ser geradas artificialmente. Buscando comprovar as previsões da teoria eletromagnética de Maxwell, aquele estudioso assentou os últimos blocos da Física Clássica e, em uma dessas ironias sempre presentes na história, descobriu acidentalmente o fenômeno que daria início à revolução quântica. No curso de suas investigações, ele notou que um eletroscópio negativamente carregado podia ser descarregado por meio da incidência de luz ultravioleta (KNIGHT, 2009, p. 1209).

Knight (2009) afirma que:

A observação de Heinrich Hertz chamou a atenção de Thomson, que concluiu que a luz ultravioleta causava a emissão de cargas negativas pelo eletrodo, restaurando, assim, a neutralidade elétrica do eletroscópio. No ano de 1899, Thomson demonstrou que as cargas emitidas eram elétrons. Neste ínterim, a emissão de elétrons por uma substância devido à incidência de luz em sua superfície tornou-se conhecida como o **Efeito Fotoelétrico**. Os elétrons emitidos eram frequentemente denominados *fotoelétrons*, a fim de indicar sua origem, mas eram idênticos, em todos os aspectos, a todos os outros elétrons.

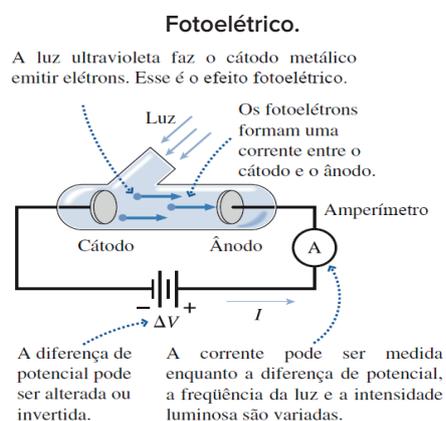
Embora tal descoberta pareça ser uma nota de rodapé na história da ciência, ela rapidamente se tornou um (ou talvez o) evento-chave que abriu a porta para ideias novas. Aqui, é possível perceber como a Física Clássica foi incapaz de explicar os detalhes do experimento em questão e tomar consciência do conceito novo e impressionante, introduzido por Einstein.

Na história da ciência, existem fatos curiosos sobre o famoso experimento; neste, realizado em 1887, em que Hertz produziu e detectou ondas eletromagnéticas, foi especificamente projetado para confirmar a teoria ondulatória da luz de Maxwell. Ao mesmo tempo, foi observado também, pela primeira vez, o

fenômeno do efeito fotoelétrico, que mais tarde ensinaria a proposição de um comportamento dualístico da luz, e não apenas o ondulatório. Hertz utilizou uma sintonização entre o circuito e um centelhador com o intuito de produzir as ondas, assim como usou a semelhança entre os circuitos para detectá-las. Desta forma, acidentalmente, notou que a luz que provinha do centelhador do transmissor, não incidia sobre o centelhador do receptor, pelo que deduziu a distância entre os eletrodos do segundo centelhador para a recepção de sinais. A luz facilitava, portanto, a produção de centelhas.

Hertz ficou deveras intrigado com a descoberta inesperada do efeito fotoelétrico; isso interferia em sua pesquisa principal, mas o cientista reconheceu a importância deste fenômeno e tratou imediatamente de interromper os seus outros trabalhos, dedicando-se por seis meses a estudá-lo com afinco. Seus resultados, publicados naquele mesmo ano, foram complementados por outros pesquisadores. Em seus estudos acabou descobrindo que partículas negativas eram emitidas quando uma superfície totalmente polida era exposta à luz. Em 1900, Phillip Lenard submeteu essas partículas a um campo magnético, chegando a uma razão carga-massa da mesma ordem que a observada nos raios catódicos estudados por Thomson; em outras palavras, as partículas emitidas eram elétrons. Construindo um tubo de vidro dotado de dois eletrodos opostos e uma janela (vide Figura 1) em que era feito vácuo a fim de facilitar a movimentação dos elétrons entre os eletrodos, aquele estudioso iluminou o eletrodo por meio da janela.

Figura 1 - Dispositivo experimental de Philip Lenard para o estudo do Efeito



Fonte: Knight (2009, p. 1209).

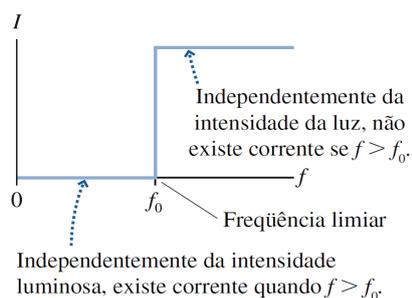
Phillip Lenard, ao iluminar o cátodo com luz ultravioleta, descobriu que se formava uma corrente de sentido anti-horário (elétrons fluindo em sentido horário). A fim de manter a mesma corrente em todo o circuito, eliminaram-se os nós neste circuito. Neste sentido, no espaço entre o cátodo e o ânodo, a corrente consiste de elétrons que se movem livremente pelo espaço (isto é, não em um fio) à mesma taxa (mesmo número de elétrons por segundo) que

a corrente do fio; e, ainda, não surge corrente se os eletrodos são mantidos no escuro – os elétrons não partem do cátodo espontaneamente, mas a iluminação causa a ejeção de elétrons, a partir do cátodo, a uma taxa constante (KNIGHT, 2009).

Aquele estudioso fez uso de uma bateria para estabelecer uma diferença de potencial ajustável ΔV entre os eletrodos. Ele pôde, então, estudar como a corrente I variava em função da diferença de potencial, da frequência e da intensidade da luz, com base nas seguintes observações, a saber:

- A corrente I é diretamente proporcional à intensidade luminosa – se a intensidade dobrar, a corrente também dobrará de valor;
- A corrente surge assim que a luz incide, sem qualquer retardo – a corrente surgia durante o intervalo de $\approx 0,1$ s de resposta do equipamento (experimentos posteriores demonstraram que a corrente surge em menos de 1 ns);
- Fotoelétrons são emitidos apenas se a frequência da luz exceder uma frequência limiar f_0 , conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - A corrente fotoelétrica em função da frequência luminosa f .

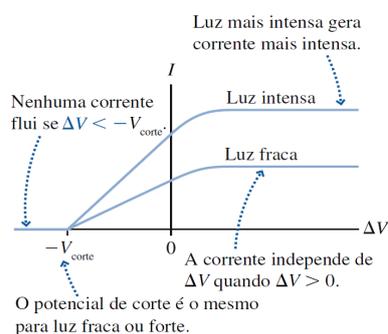


Fonte: Knight (2009, p. 1209).

- O valor da frequência limiar f_0 depende do tipo de metal que constitui o cátodo;
- Se a diferença de potencial ΔV for positiva (ânodo positivo com relação ao cátodo), a corrente não variará com o aumento de ΔV , e se ΔV tornar-se negativa (ânodo negativo com relação ao cátodo) pela inversão da bateria, a corrente decrescerá até atingir o valor nulo em um

determinado valor de voltagem $\Delta V = -V_{\text{corte}}$. O valor de V_{corte} é denominado potencial de corte, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - A corrente fotoelétrica em função do potencial da bateria.



Fonte: Knight (2009, p. 1209).

- f) O valor de V_{corte} é o mesmo para intensidades luminosas fracas ou fortes, isto é, luz mais intensa gera corrente maior, conforme evidencia a Figura 3 (todavia, em ambos os casos, a corrente cessa quando $\Delta V = -V_{\text{corte}}$).

A interpretação vista de forma clássica

A mera existência do EF não constitui uma dificuldade para a Física Clássica. Os elétrons são os portadores de carga nos metais, em que eles se movem livremente como se formassem um “mar” de partículas negativamente carregadas.

Os elétrons estão ligados ao metal e não são espontaneamente liberados de um eletrodo à temperatura ambiente. Porém, um pedaço de metal aquecido a temperaturas suficientemente altas, por exemplo, o ferro a 1000 K mostrando-se na cor rubra, ou ainda, na liga de tungstênio presente em lâmpadas incandescente, ao ser aquecido a 4000 K emite uma luz branco-amarelada, emitindo elétrons em um processo denominado emissão térmica. O tubo de elétrons dos antigos televisores ou monitores de computador utiliza a emissão térmica a partir de um filamento de tungstênio aquecido.

Assim, faz-se necessária uma energia mínima para liberar um elétron de um metal. Para extrair um elétron, é preciso exercer uma força sobre ele (isto é, realiza-se trabalho sobre o elétron) até que sua energia seja suficientemente grande para que ele escape. A energia mínima E_0 necessária para liberar um elétron em um metal é denominada função-trabalho do metal, aqui representada pela letra grega ϕ . Alguns elétrons podem necessitar de mais energia do que E_0 para escapar, mas todos os elétrons precisarão ao menos de E_0 .

Metais diferentes possuem diferentes funções-trabalho. Sobre a questão, a Tabela 1, apresenta uma pequena lista, em que as funções-trabalho são dadas em elétron volts (eV).

Tabela 1 - A função-trabalho para alguns elementos.

Elemento	ϕ em E_0 (eV)
Potássio	2,30
Sódio	2,75
Alumínio	4,28
Tungstênio	4,55
Cobre	4,65
Ferro	4,70
Ouro	5,10

Fonte: Knight (2009, p. 1210).

Aquecer um metal aumenta a energia térmica dos elétrons. Em temperaturas suficientemente altas, como o ferro a 1000 K a energia cinética de uma pequena percentagem dos elétrons pode exceder o valor da função-trabalho. Tais elétrons podem, então, deixar o metal. Na prática, são poucos os elementos, como o tungstênio, para os quais a emissão térmica torna-se significativa antes de o metal se fundir.

Ao admitir ser possível elevar a temperatura apenas dos elétrons, via aumento de sua energia cinética, e não da rede cristalina como um todo, tem-se a iluminação da superfície metálica. Neste sentido, como as ondas eletromagnéticas são absorvidas pelos elétrons de condução, e não pelos íons positivos, a onda luminosa transfere sua energia apenas aos elétrons. Após algum tempo transcorrido, os elétrons transferirão energia para a rede cristalina; mas, se a luz for suficientemente intensa, a temperatura eletrônica pode se tornar substancialmente maior do que a temperatura do metal. Aqui vale destacar que, no ano de 1900, era plausível pensar que uma luz intensa causasse a emissão térmica dos elétrons sem fundir o metal.

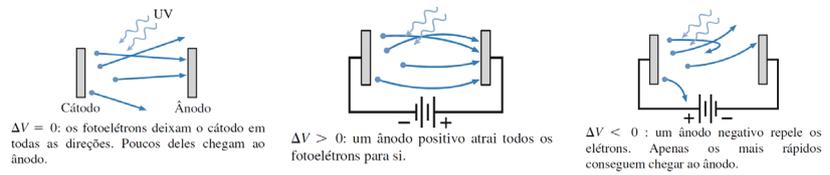
O potencial de corte

Os fotoelétrons deixam o cátodo com certa energia cinética. Dentro do metal, um elétron com energia $E_{\text{elétron}}$ perde energia ΔE ao escapar, isto é, emerge como um fotoelétron com energia cinética $K = E_{\text{elétron}} - \Delta E$. A energia da função-trabalho, E_0 , é a energia mínima necessária para remover um elétron; logo, a energia cinética máxima de um fotoelétron é

$$K_{max} = E_{\text{elétron}} - E_0 \quad (2)$$

Após deixarem o cátodo, os fotoelétrons se movem em todas as direções. Alguns chegam ao ânodo, gerando uma corrente mensurável, mas muitos não conseguem fazê-lo.

Figura 4 - A corrente fotoelétrica depende do potencial do ânodo.

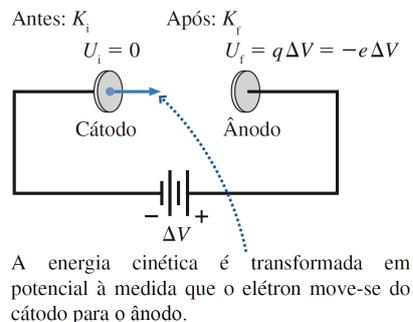


Fonte: Knight (2009, p. 1210).

A figura 4 evidencia que um ânodo positivo atrai todos os fotoelétrons para si. Uma vez que todos os fotoelétrons atingem o ânodo, um aumento em ΔV não gerará qualquer acréscimo na corrente I – razão para as linhas horizontais no lado direito do gráfico da Figura 3.

Um ânodo negativo repele os elétrons. Contudo, os fotoelétrons que partem do cátodo com energia cinética suficientemente grande podem vencer esta força de repulsão e atingir o ânodo. A corrente diminui uniformemente à medida que a voltagem se torna mais e mais negativa, até atingir o potencial de corte, quando todos os elétrons retornam e a corrente cessa – comportamento observado à esquerda da Figura 3.

Figura 5 - A energia é conservada.



Fonte: Knight (2009, p. 1211).

Ao considerar o cátodo como o zero da energia potencial, conforme ilustrado pela Figura 5, um elétron emitido pelo cátodo com energia cinética K_i possui uma energia total inicial dada como

$$E_i = K_i + U_i = K_i + 0 = K_i \quad (3)$$

Quando o elétron atinge o ânodo, que está a um potencial ΔV em relação ao cátodo, ele possui energia potencial igual a $U = q\Delta V = -e\Delta V$ e energia total final

$$E_f = K_f + U_f = K_f - e\Delta V. \quad (4)$$

Da conservação de energia, $E_f = E_i$ a energia cinética final do elétron fica

$$K_f = K_i + e\Delta V \quad (5)$$

O elétron acelera ($K_f > K_i$) caso ΔV seja positiva, e desacelera caso ΔV seja negativa, mas, ainda assim, ele atingirá o ânodo ($K_f > 0$) se K_i for suficientemente grande.

Um elétron com energia cinética inicial K_i ficará inerte ao alcançar o ânodo se a diferença de potencial for $\Delta V = -K_i/e$. A diferença de potencial que faz com que os elétrons mais rápidos, aqueles com $K = K_{max}$, retornem ao cátodo, cessando a corrente, é igual a

$$\Delta V_{\text{elétron mais rápido}} = -\frac{K_{max}}{e}. \quad (6)$$

Por definição, a corrente elétrica é obtida pela diferença de potencial $\Delta V = -V_{corte}$, em que V_{corte} é o potencial de corte,

$$V_{corte} = \frac{K_{max}}{e}. \quad (7)$$

Portanto, a energia cinética máxima dos fotoelétrons é determinada pelo potencial de corte.

Os limites da interpretação clássica

Uma análise clássica com base na emissão térmica de elétrons por um metal explica as observações de Phillip Lenard¹¹. Porém, nada ali sugere que deveria existir uma frequência de limiar. Neste sentido, se uma luz de baixa intensidade e com frequência maior que a de f_0 produz uma corrente, porque isso não ocorre com uma luz mais intensa, mas que apresenta frequência menor que a de f_0 ?

E quanto à observação de Lenard sobre a instantaneidade da corrente? Se os fotoelétrons se originam da emissão térmica, deveria existir um instante de tempo em que a luz eleve a temperatura dos elétrons ao ponto que escapassem.

De fato, cálculos bastante simples comprovam que levaria muitos minutos até atingir o ponto em que a carga começasse a fluir; mas, como já ressaltado, a experiência mostra que a transmissão da energia é feita de modo quase instantâneo.

¹¹ a) A corrente I é diretamente proporcional à intensidade luminosa – se a intensidade dobrar, a corrente também dobrará de valor; e) Se a diferença de potencial ΔV for positiva (ânodo positivo com relação ao cátodo), a corrente não variará com o aumento de ΔV , e se ΔV tornar-se negativa (ânodo negativo com relação ao cátodo) pela inversão da bateria, a corrente decresce até zerar a um valor específico de voltagem $\Delta V = -V_{corte}$.

Finalmente, a luz mais intensa deveria aquecer os elétrons a temperaturas mais altas, elevando a energia cinética máxima dos fotoelétrons e aumentando o potencial de corte V_{corte} . Entretanto, Lenard chega à conclusão da independência da intensidade da luz e o potencial de corte.

Embora a simples presença dos fotoelétrons não seja surpreendente, a Eletrodinâmica Clássica era incapaz de explicar o seu comportamento observado. A frequência de limiar e a instantaneidade da corrente pareciam difíceis de ser explicar.

A explicação de Einstein

Max Planck, no ano de 1900, buscou entender com detalhes o espectro de corpo negro da luz emitida por um objeto incandescente. Este problema resistia a uma análise clássica, e Planck encontrara uma hipótese pouco usual para explicar com perfeição o espectro da radiação emitida por um corpo negro: na posição de equilíbrio os átomos realizam uma vibração ao redor de uma determinada posição com frequência f ; no oscilador harmônico clássico a energia depende de sua amplitude assumindo assim qualquer valor. Com a finalidade de deduzir o espectro corretamente, Planck teve que supor que os átomos oscilantes não tivessem a liberdade de possuir qualquer valor de energia; isto é, a energia dos átomos que vibrassem com uma frequência f tinha de assumir um dos valores específicos $E = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots$, em que h é uma constante – as energias de vibrações seriam, assim, quantizadas.

Planck, após comparar seus cálculos com os resultados experimentais, determinou o valor da constante h – a constante de Planck. Seu valor é

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV} . \quad (8)$$

O primeiro valor, em unidades do Sistema Internacional, é apropriado para grande parte dos cálculos, mas é possível notar que o segundo é útil quando as energias estão expressas em eV.

O ano de 1905 foi aquele em que Einstein publicou seu artigo sobre a Teoria da Relatividade – temática mais conhecida pelo público em geral. Também, neste mesmo ano, publicou outro artigo, agora sobre a natureza da luz, em que propõe uma ideia ousada, mas extremamente simples, para explicar os dados de Phillip Lenard sobre o EF.

Einstein foi ainda mais longe, sugerindo que a radiação eletromagnética fosse quantizada não apenas quanto à energia, mas também estrutural e ontologicamente; isto é, a luz não seria uma onda contínua, mas se propagaria segundo pequenos pacotes discretos de energia. Ele denominou cada pacote de

energia de quantum de luz, além de postular que a energia de um quantum de luz é diretamente proporcional à frequência luminosa (CARUSO, 2016). Logo, cada quantum de luz possui uma energia igual a

$$E = hf, \quad (9)$$

em que h é a constante de Planck e f é a frequência da luz.

Três são os postulados enunciados por Einstein sobre os quanta de luz interagindo com a matéria, quais sejam:

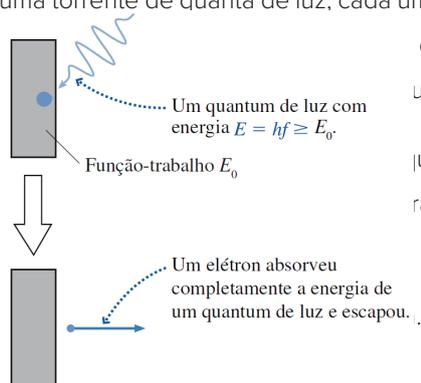
A luz de frequência f consiste de quanta definidos, cada um com energia $E = hf$ (cada fóton viaja, no vácuo, à velocidade da luz, c , que é aproximadamente igual a 300000000 m/s);

Cada quanta de luz é emitido ou absorvido integralmente (uma substância pode emitir 1, 2 ou 3 quanta, mas não uma fração de quantum, por exemplo, 1 + 0,5 quantum – logo, um elétron de um metal não pode absorver a metade de um quantum, mas apenas um número inteiro dele); e

Um quantum de luz, quando absorvido pelo metal, transfere a totalidade de sua energia a um único elétron.

Tais postulados evidenciam que a luz incide em porções, que as porções não podem ser divididas, e que a energia de uma porção é entregue a um elétron apenas em um processo de colisão. Eles são cruciais para a compreensão das novas ideias que originaram a Física Quântica e estão em total oposição aos conceitos da Física Clássica, em que a energia pode ser continuamente subdividida e compartilhada.

Assim, se Einstein estiver certo, a luz com frequência f que ilumina o metal é uma torrente de quanta de luz, cada um com energia hf , (KNIGHT, 2009). Cada



cedendo ao elétron uma energia $E_{el\acute{e}tron}$ usões interessantes, a saber:

um quantum de luz possui $E_{el\acute{e}tron} = hf$
 a temperatura ambiente é tão menor do que hf

Fonte: Knight (2009, p. 1214).

A figura 6 indica que tal elétron pode escapar do metal, tornando-se um fotoelétrico, desde que

$$E_{el\acute{e}tron} = hf \geq E_0. \quad (10)$$

Em outras palavras, existe uma frequência de limiar, dada por

$$f_0 = \frac{E_0}{h} , \quad (11)$$

para a ejeção de fotoelétrons. Assim, se f for menor que f_0 , mesmo por uma pequena diferença, nenhum elétron terá energia mínima para escapar; e isso independe de quão intensa seja a iluminação. Todavia, mesmo uma luz fraca (poucos fótons) que, entretanto, tenha $f \geq f_0$, transferirá energia suficiente para que alguns elétrons escapem, pois cada quantum só transfere energia para um único elétron.

Tal comportamento limiar é exatamente o que foi observado por Phillip Lenard. A frequência de limiar é diretamente proporcional à função-trabalho. Metais com função-trabalho elevada (ferro, cobre e ouro, por exemplo) exibem o EF somente quando iluminados com luz ultravioleta de alta frequência. Para metais com valores de E_0 menores (sódio e potássio, por exemplo), a fotoemissão se dá para frequências mais baixas, no visível.

Quanto maior a intensidade da luz maior será quantidade de transferência de quanta de luz para a superfície, que ejetam um número maior de fotoelétrons, gerando correntes mais intensas.

Há uma distribuição de energias cinéticas, pois diferentes fotoelétrons necessitam de diferentes energias para escapar, sendo a energia cinética máxima dada por

$$K_{max} = E_{el\acute{e}tron} - E_0 = hf - E_0 . \quad (12)$$

Diante do exposto, o potencial de corte V_{corte} é diretamente proporcional a K_{max} . Einstein em sua teoria assume que o potencial de corte está relacionado com a frequência luminosa na forma

$$V_{corte} = \frac{K_{max}}{e} = \frac{hf - E_0}{e} . \quad (13)$$

O potencial de corte é, assim, independente da intensidade da luz. Logo iluminações fracas ou fortes apresentarão o mesmo potencial de corte, conforme Lenard observara, mas sem a explicação anterior.

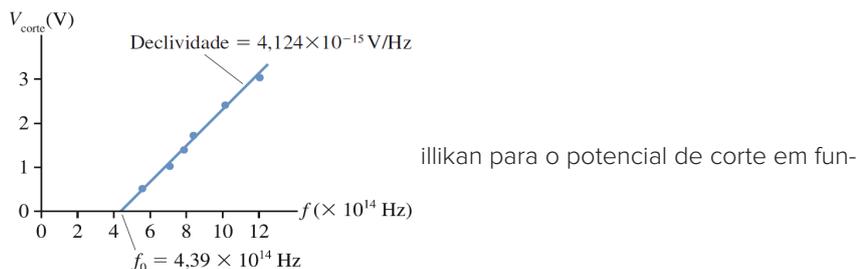
Se cada quantum de luz transfere sua energia hf para apenas um elétron, este imediatamente adquire energia para escapar. A corrente deve, então, ser instantânea, sem retardos, exatamente como observado por Lenard.

As hipóteses de Einstein explicam não apenas as observações de Lenard, mas fazem uma nova previsão. Conforme a Equação 8, o potencial de corte deveria se dar em função linear crescente da frequência luminosa f . As-

sim, é possível reescrever a Equação 14 em termos da frequência de limiar $f_0 = E_0/h$ na forma

$$V_{\text{corte}} = \frac{h}{e}(f - f_0). \quad (14)$$

Um gráfico do potencial de corte V_{corte} versus frequência da luz f deveria partir do zero, em $f = f_0$ e aumentar linearmente com declividade h/e . De fato, a declividade do gráfico fornece um método de mensuração da constante de Planck.



Fonte: Knight (2009, p. 1215).

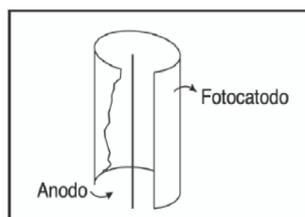
Lenard não havia medido o potencial de corte para diferentes frequências, de modo que Einstein o propôs como uma previsão não testada de sua teoria. Robert Millikan aceitou o desafio, uma vez que já havia realizado experimentos com uma gota de óleo para medir a relação entre a carga e a massa do elétron. Alguns de seus dados para um cátodo de césio estão reproduzidos na Figura 7 que demonstram experimentalmente as previsões de Einstein ao revelar a existência de linearidade entre frequência f e o potencial de corte V_{corte} .

Millikan, a fim de determinar h , calculou a declividade de seu gráfico e o multiplicou por e (valor este encontrado anos antes com o experimento da gota de óleo). Tal valor estava em acordo com o valor obtido por Planck no ano de 1900, em um experimento totalmente distinto. De fato, os quanta de luz, eram reais!

O fenômeno do efeito fotoelétrico permite inúmeras aplicações tecnológicas. Uma célula fotoelétrica a vácuo é uma válvula constituída de um catodo fotosensível (fotocatodo), de grande área, colocado no interior de um bulbo selado e de um anodo coletor de elétrons sob a forma de um fio ou anel colocado à frente do fotocatodo (vide Figura 8).

A aplicação mais utilizada na Física é a válvula fotomultiplicadora, constituída de uma fotocélula e de um conjunto de anodos auxiliares (dinodos), que têm a função de multiplicar o número de elétrons fotoemitidos, feitos de substâncias de baixa função trabalho, responsáveis por uma emissão secundária de elétrons em número bem maior que o incidente.

Figura 8 - Esquema de uma célula fotoelétrica a vácuo.



Fonte: Caruso (2016, p. 319).

Em relação aos componentes da segunda categoria, a quebra de ligações covalentes em semicondutores devido à ação dos fótons (EF interno) é muito utilizada nas resistências fotoelétricas, denominadas Light Dependent Resistor (LDR), em português Dispositivo Dependente da Luz, ou em dispositivos que transformam a energia luminosa em elétrica, como, por exemplo, os fotômetros, que permitem avaliar a intensidade da iluminação a partir da corrente elétrica. No mesmo processo tem-se o funcionamento das pilhas solares utilizadas em foguetes espaciais ou em qualquer calculadora eletrônica portátil.