UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
MESTRADO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E EDUCAÇÃO MATEMÁTICA

ANÁLISE DA HISTÓRIA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA PARA GRADUAÇÃO

JOANA MENARA SOUZA SOARES

Campina Grande/PB

2016

JOANA MENARA SOUZA SOARES

ANÁLISE DA HISTÓRIA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA PARA GRADUAÇÃO

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências e Educação Matemática.

Área de concentração: Ensino de Ciências
Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

Campina Grande/PB

2016

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S676a Soares, Joana Menara Souza.
Análise da história do efeito fotoelétrico em livros didáticos de física para graduação [manuscrito] / Joana Menara Souza Soares. - 2016.
86 p. : il.

Digitado.
Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ensino de Ciências e Educação Matemática) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, Departamento de Física".

1. Efeito fotoelétrico. 2. História da Ciência. 3. Ensino de Física. 4. Livro didático. I. Título.

21. ed. CDD 371.32

JOANA MENARA SOUZA SOARES

ANÁLISE DA HISTÓRIA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA PARA GRADUAÇÃO

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Aprovada em 19 / 08 / 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio Barros
Departamento de Física/CCT/UEPB
Orientador

Prof. Dr. Jean Paulo Spinnely da Silva
Departamento de Física/CCT/UEPB
Examinador Interno

Prof. Dr. Jenner Barreto Bastos Filho
Departamento de Física/UFAL
Examinador Externo

A Deus. Essa força superior que orienta e que é Senhor de todas as coisas!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos pelo apoio incondicional durante toda essa caminhada, pelos ensinamentos e afeto.

Ao orientador, Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, agradeço o apoio constante, a paciência e a transmissão de vastos conhecimentos.

Aos professores Ana Paula Bispo, Jean Spinelly e Jenner Bastos pela disposição em compor a banca examinadora e pelas grandes contribuições dadas para o enriquecimento desse trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Educação Matemática da UEPB, que por meio de seu corpo docente, propiciou inúmeras contribuições acadêmicas.

Enfim, todos aqueles que de alguma forma participaram e contribuíram nessa caminhada, meus sinceros agradecimentos!

Sempre haverá umas poucas almas melhor nascidas do que outras, que sentem o peso do jugo e não evitam sacudi-lo. Almas que nunca se acostumam à sujeição.

Etienne de La Boétie

RESUMO

Atualmente, muito se discute sobre a presença e a importância da História da Ciência (HC) no ensino de Física. Associada a essa premissa, temos visto uma crescente produção de trabalhos acadêmicos, na qual se tem enfatizado uma abordagem histórica e filosófica inserida em conteúdos dessa disciplina. Percebe-se, por outro lado, que alguns desses trabalhos não chegam ao professor, deixando-os a mercê de histórias distorcidas e/ou simplificadas, presentes na maioria dos livros didáticos (LD), o que termina por reforçar alguns conhecidos mitos científicos, transmitindo falsas concepções históricas a estudantes e professores. Assim, considerando a importância da HC, destacamos a relevância de se examinar a presença dessa inter-relação nos livros didáticos de Física para o ensino superior, verificando se há ou não umas transposições históricas adequadas, sobre o efeito fotoelétrico e como esses materiais, que visam formar o professor apresentam o contexto histórico do fenômeno em questão. A análise e discussão dos resultados aqui apresentados tomam como base alguns critérios que levam em consideração aspectos históricos do fenômeno e bem como da ciência, atentando para presença de mitos científicos e de relatos bibliográficos distorcidos sobre os cientistas envolvidos.

Palavras Chave: Efeito fotoelétrico, História da Ciência, Livros Didáticos de Física.

ABSTRACT

Currently, much has been discussed about the presence and importance of the History of Science (HC) in teaching physics. Associado a essa premissa, temos visto uma crescente produção de trabalhos acadêmicos, na qual se tem enfatizado uma abordagem histórica e filosófica inserida em conteúdos dessa disciplina. It is clear, however, that some of these jobs do not come to the teacher, leaving them at the mercy of distorted stories and / or simplified, present in most textbooks (LD), which ends up reinforcing some known scientific myths, transmitting false historical concepts to students and teachers. So, considering the importance of HC, we highlight the importance of examining the presence of this interrelationship in Physics textbooks for higher education by checking whether or not a historical proper transpositions on the photoelectric effect and how these materials, which They aim to train the teacher present the historical context of the phenomenon in question. Analysis and discussion of the results presented here should be based on some criteria that take into account historical aspects of the phenomenon as well as science, noting the presence of scientific myths and distorted bibliographic reports on the scientists involved.

Keywords: Photoelectric effect; history of science; Textbooks of Physics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....11
2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO EFEITO FOTOELÉTRICO.....15
2.1 A "Descoberta" do fenômeno por Hertz.....15
2.1.1 Do aparato experimental.....17
2.1.2 Algumas considerações.....20
2.2 A hipótese do gatilho de Philipp Lenard.....21
2.2.1 O aparato experimental utilizado por Lenard.....22
2.2.2 As considerações de Lenard sobre o efeito fotoelétrico.....23
2.2.3 Algumas considerações.....24
2.3 Einstein e a teoria dos quanta.....25
2.3.1 Einstein e o valor da energia do quantum.....27
2.3.2 As considerações de Einstein sobre o efeito fotoelétrico.....34
2.3.3 Algumas considerações.....36
2.4 Millikan e a comprovação experimental para o efeito fotoelétrico.....37
2.4.1 Desenvolvimento experimental.....39
2.4.2 Algumas considerações.....44
3. A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS.....46
3.1 Por que utilizar a História da Ciência (HC)?.....46
3.2 Sobre o uso da História da Ciência (HC) para o ensino e suas dificuldades.....48
3.3. Algumas inadequações frequentes na utilização da HC.....50
3.4. Por que analisar os Livros Didáticos (LD)?.....55
4. METODOLOGIA DA PESQUISA.....58
4.1 Procedimentos metodológicos.....58
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....64
5.1. Livros analisados.....64
5.2. Critérios de análise.....65
5.2.1. Critérios para análise da descrição histórica do fenômeno.....66
5.2.2. Critérios para análise da presença de inadequações.....68
5.3. Resultado das análises.....69
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....81
7. REFERÊNCIAS.....83

1. INTRODUÇÃO

Entre as discussões atuais que visam melhorar a qualidade do ensino de ciências, mais especificamente de Física, a incorporação de elementos de História da Ciência (HC) tem sido promissora e abordada, sob diversas perspectivas, por vários autores (ALLCHIN 2004; MARTINS, 2006; 2007; MATTHEWS, 1994; 1995). A ideia da inserção dessa abordagem é tornar o referido ensino mais estimulante e desmitificar a concepção criada de *grandes gênios*, a fim de humanizar um pouco mais a ciência, permitindo uma melhor contextualização do conhecimento.

A escolha de se trabalhar essa temática, no âmbito de uma dissertação de Mestrado, está diretamente relacionada a situações vivenciadas ao longo da minha vida estudantil. Durante a minha formação em Licenciatura em Física e também no Mestrado, tive a oportunidade de discutir alguns fundamentos históricos relativos à Mecânica Clássica, Física Moderna e à Quântica, que me forneceu uma visão histórica diferente daquela que tinha anteriormente. Alguns autores (MARTINS, 2006; MATTHEWS, 1994; WHITAKER, 1979; entre outros) já nos alertavam sobre possíveis inadequações. Dentre esses autores, Martins (op. cit.) mostra as várias estórias presentes em textos históricos, comumente repassadas para alunos como sendo uma verdade incontestável.

Durante minha formação acadêmica, especificamente na disciplina de História da Física, tive a oportunidade de discutir detalhadamente alguns episódios históricos, e, nessas discussões, por diversas vezes, me deparei com uma série de pseudo-história da ciência que permeavam os materiais que eram analisados[1] durante as aulas. Como resultado, constantemente encontrava textos que traziam uma visão simplificada, normalmente apresentada através de mitos científicos (a título de exemplificação, o caso da maçã de Newton, a banheira de Arquimedes, entre outros) que promovem uma visão simplificada e deturpada para quem utiliza esses materiais.

A ideia que me parece mais pertinente é a de que esses mitos e anacronismos são utilizados na tentativa de simplificar o conteúdo e facilitar a sua compreensão. De maneira geral, as inadequações históricas presentes nesses materiais parecem ser usadas como uma ferramenta com propósitos pedagógicos de tornar o entendimento conteudístico mais acessível. Contudo, podem passar uma visão distorcida do processo de desenvolvimento da

[1] Essas análises eram realizadas por meio da comparação do material proposto pelo professor, geralmente textos encontrados na internet, com artigos originais ou secundários de boa qualidade.

ciência, fazendo-nos acreditar que esta se desenvolveu quase que instantaneamente ao longo do tempo, sem a existência de erros ou conflitos, tendo, portanto, uma lista pouco extensa de alguns gênios vencedores.

No desenvolvimento dessa pesquisa, várias referências bibliográficas (KUHN, 1998; MARTINS, 2005; MARTINS, 2006; 2007; MATTHEWS, 1994; 1995; WHITAKER, 1979) apontavam, de forma significativa, para uma percepção distorcida e superficial da HC. A pseudo-história encontrada na maioria dos livros didáticos de Física reforça alguns conhecidos mitos científicos e transmite falsas concepções históricas a estudantes e professores. Tais percepções evidenciam a necessidade de trabalhos que enfatizem abordagens históricas de boa qualidade acerca de conteúdos de Física. Mesmo com a crescente produção na área (TEIXEIRA, et al., 2012), os trabalhos produzidos não chegam aos alunos e professores (principalmente àqueles do Ensino Médio), deixando-os a mercê dessas estórias fantasiosas e simplificadas.

Neste contexto, nossa preocupação se volta para os livros didáticos usados na formação de futuros professores, na maioria das Universidades e nos cursos de Licenciatura em Física. Como discutido em Martins (2006) e Whitaker (1979), esses materiais estão permeados por inadequações e mediante narrativas, que se estruturam em diversos artifícios retóricos, estabelecendo o mito. Esse mito tem como propósito explicar e justificar a autoridade da ciência. Segundo Allchin (2003), esses elementos conspiram juntos para desmoronar a natureza científica em uma pseudo-história, que se torna muito familiar, de *Como a Ciência encontra a verdade*.

Ao citar os materiais de estudo usados durante minha formação, destaco os livros didáticos, pois, esses são elementos essenciais para estabelecer uma ligação entre professores e alunos, conhecimentos científicos e narrativas históricas. Dessa inter-relação, a presente dissertação é norteada pelas questões de pesquisa: Como a história do efeito fotoelétrico é apresentada pelos livros voltados para cursos de graduação? Será que esses materiais estão imunes ao mito e pseudo-história?

Buscando responder às questões, inicialmente, recorremos à literatura (LEITE, 2002; KLASSEN, 2009b; NIAZ et al., 2010; PAGLIARINI, 2007) que aponta para lacunas e inadequações em conteúdos históricos nos livros didáticos de física, para o nosso caso, no que se refere aos ensinamentos do efeito fotoelétrico. Ao considerarmos a possibilidade do uso da HC no ensino e a importância de se ensinar um conteúdo relacionado a uma Física dita moderna, torna-se relevante examinar essa articulação nos livros didáticos.

Assim, para a análise dos livros acadêmicos escolhidos, procuramos levar em consideração dois aspectos importantes: I) a apresentação do material sobre o conteúdo histórico do fenômeno em questão, tomando como referência nossa fundamentação teórica (capítulo 2); II) Como o processo de desenvolvimento do fenômeno é discutido por esses materiais, conforme alguns aspectos discutidos em nossa revisão de literatura (capítulo 3).

A análise histórica do fenômeno que questionamos em livros didáticos se justifica por estes se constituírem em uma ferramenta balizadora, que assume o papel principal como fonte de conhecimento, na relação de ensino/aprendizagem entre professor e aluno, dentro e fora da sala de aula. Desse modo, outros meios de estudo e divulgação da ciência, como, por exemplo, revistas, documentários educacionais, museus de ciência, textos de divulgação científica, entre outros dessa natureza, atuam como complemento na formação do aprendiz.

Em face da relevância apresentada, esta dissertação segue um plano organizacional em seis capítulos, contemplando os processos de desenvolvimento sugeridos por seus respectivos objetivos. No segundo capítulo, realizamos um levantamento dos fundamentos históricos que pontuaram a origem do efeito fotoelétrico, a partir de Hertz (1886) até Millikan (1916), com sua comprovação experimental. Para evolução histórica delineada, tomamos como fonte de pesquisa alguns livros e artigos originais e secundários (HERTZ, 1893; EINSTEIN, 1905; KUHN, 1978; LENARD, 1902; 1906; MILLIKAN, 1916; 1924; SEGRÈ, 1987; SHAMOS, 1987; WHEATON 1983) pertinentes à perspectiva defendida.

No terceiro capítulo, discorremos acerca de alguns questionamentos pertinentes à adoção da HC enquanto uma abordagem diferencial para o ensino de Física: Por que utilizar a HC no ensino de Física? Quais as inadequações mais encontradas nos materiais utilizados para esse estudo? Para essa discussão, embasamo-nos nos autores (MATTHEWS, 1994; MATTHEWS, 1995; MARTINS, 2005; MARTINS, 1990, entre outros) que propiciam suporte teórico para debater essa abordagem.

No quarto capítulo, relatamos o procedimento metodológico assumido. Apresentamos que a opção de escolha pela abordagem qualitativa ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, permitindo descrever, compreender e analisar como se dá o perfil histórico contemplado pelos livros de física sobre o efeito fotoelétrico.

O quinto capítulo, aqui chamado de discussão e análise de resultados, apresentamos aos leitores os livros que foram analisados, bem como delineamos

brevemente os motivos de nossas escolhas. Ainda nesse capítulo, apresentamos os critérios de análises elaborados para essa pesquisa e por fim, discutimos os conteúdos presentes nesses materiais, atentando para o fato se eles apresentam ou não uma transposição didática adequada, no sentido de explicar historicamente o efeito fotoelétrico.

No sexto capítulo, apresentamos nossas considerações finais, que nos apontam para uma visão distorcida presente na maioria dos textos que discutem sobre a HC. Isso posto, respondemos nossa pergunta de pesquisa, a partir da análise de conteúdo referente ao efeito fotoelétrico, apresentado nos livros aqui analisados.

2. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Nesta etapa de nossa pesquisa, tomamos como referência trabalhos originais e secundários sobre o percurso histórico que levou à elucidação do efeito fotoelétrico. Para isso, buscamos na literatura (HERTZ, 1893; EINSTEIN, 1905; LENARD, 1902; LENARD, 1906; MILLIKAN, 1916; MILLIKAN, 1924; JAMMER, 1966; WHEATON, 1983; SHAMOS, 1987; KUHN, 1987; MANGILI, 2012; VIDEIRA e COELHO 2012; MARTINS 2014; dentre outros) subsídios necessários para descrevermos desde a primeira verificação conhecida para o fenômeno até sua verificação experimental.

Os estudos sobre o fenômeno em foco ocorreram com maior intensidade no fim do século XIX e início do XX, totalizando cerca de 30 anos de história. Ao longo desse período, quatro importantes vertentes teóricas investigaram a ocorrência de vários pequenos episódios que tiveram notável valor científico para a explicação do efeito fotoelétrico. Por este motivo, nesta dissertação, discutimos os quatro pontos referidos, quais sejam:

1) A "descoberta" do fenômeno por Hertz;
2) A hipótese do gatilho de Philipp Lenard;
3) Einstein e a teoria dos quanta;
4) Millikan e a verificação experimental.

A discussão desses episódios é imprescindível para um detalhamento mais acurado acerca do efeito fotoelétrico e para uma melhor compreensão do mesmo. Contudo, vale salientar que esses não foram os únicos estudos realizados. Nesse sentido, sempre que necessário, serão destacados alguns outros episódios relevantes para esse estudo.

2.1 A "Descoberta" do fenômeno por Hertz

Para situarmos historicamente, no fim do século XIX, a comunidade científica se dedicava aos estudos dos fenômenos eletromagnéticos e procurava estabelecer uma relação entre a onda eletromagnética e a luz, tentando entender como era sua interação com o meio na qual se propagava (MANGILI, 2011). A descoberta da relação existente entre a

eletricidade e o magnetismo atribuída a Oersted[2], em 1820, forneceu importante contribuição para o aprofundamento nos estudos desse fenômeno. A elaboração de vinte importantes equações por James Clerk Maxwell[3], sumarizadas em 1863 e simplificadas por Oliver Heaviside[4], em 1884, que conseguiu condensá-la em quatro equações, demonstrava que os campos elétrico e magnético se propagavam à velocidade da luz. As famosas "Equações de Maxwell" estabeleceram formalmente o conceito de ondas eletromagnéticas, tornando-se uma das descobertas mais importantes no campo da Física, uma vez que significou a unificação do Eletromagnetismo com a Óptica, duas áreas da Física, até aquele momento, consideradas completamente distintas, conforme apresenta Shamos (1987).

De acordo com Shamos (1987), podemos verificar que as equações de Maxwell sugerem a existência de ondas eletromagnéticas, que se movimentam através de dielétricos[5], que em sua maioria eram baseadas nas linhas de força de Faraday[6]. Maxwell havia previsto que a radiação deveria ser gerada a partir de oscilações elétricas e ser propagada através do espaço livre com a mesma velocidade da luz. Foi essa a sugestão que Hertz decidiu testar experimentalmente.

Para entender o que levou Heinrich Rudolf Hertz a realizar esse trabalho experimental, voltaremos alguns anos na história, a fim de perceber seu percurso acadêmico e o que o levou por esse caminho. No livro de Videira, Coelho (2012), podemos perceber que o interesse de Hertz por esses estudos surgiu de seu convívio com Hermann Von Helmholtz[7], desde 1878, quando aquele trabalhou como ajudante de laboratório deste em uma universidade de Berlim, conquistando sua confiança e admiração, por se dedicar às atividades demandadas. No entanto, suas ligações estavam além da relação mestre e discípulo, ambos partilhavam pontos de vista científicos e filosóficos bastante semelhantes.

No período em questão, Helmholtz mostrava-se inquieto e incomodado com os estudos que envolviam a eletrodinâmica, já que estavam permeados por incertezas, com leis fundamentadas em simples suposições. De acordo com Coelho (op. cit.), o fato de essa

---

[2] O físico e químico dinamarquês Hans Christian Oersted mostrou que corrente elétrica (chamada na época de fluido elétrico) gera campo magnético.

[3] O físico e matemático britânico James Clerk Maxwell, conjecturou a união entre a eletricidade, o magnetismo e a óptica.

[4] O matemático inglês Oliver Heaviside foi um dos criadores do cálculo vetorial.

[5] Isolante elétrico que, sob a atuação de um campo elétrico exterior acima do limite de sua rigidez dielétrica, permite o fluxo da corrente elétrica.

[6] O físico e químico inglês Michael Faraday é considerado um dos cientistas mais influentes de todos os tempos, principalmente, por suas pesquisas experimentais sobre a eletricidade.

[7] O físico alemão Hermann Helmholtz escreveu sobre assuntos diversos acerca da idade da Terra até a formação do sistema solar.

área ter ficado conhecida pela dubiedade de seus limites desconhecidos corroborou para que esse estudioso se dedicasse a oferecer maiores contribuições de análise e esclarecimentos. Até então, as leis da eletrodinâmica eram deduzidas com base nas hipóteses de Wilhelm Weber[8], que buscava explicar fenômenos elétricos e magnéticos por meio de uma modificação na suposição de Newton, conjecturando a existência da ação de força à distância. Para ele, a força entre duas cargas em movimento não dependiam apenas dessa distância entre elas, mas também de sua velocidade e aceleração. Contudo, Helmholtz se opôs fortemente a essas suposições de Weber, julgando a hipótese da ação de forças à distância completamente infundadas. Por conseguinte, diante desse episódio, no ano de 1878, a universidade de Berlim ofereceu um prêmio para quem conseguisse resolver essa problemática, conseguindo determinar se as cargas em movimento (que produzia a corrente elétrica no condutor) possuíam massa inercial. Como nos apontam Hertz (1893), Coelho (2012), Shamos (1987).

O desafio foi aceito por ambos. Weber prosseguiu em seus estudos e Helmholtz, ofereceu a Hertz a oportunidade de trabalhar nesse caso. Hertz contou com uma excelente condição laboratorial para desenvolver seus experimentos. Hertz conseguia enxergar o problema com clareza e rapidamente descreveu uma solução. Após conseguir resolver esse problema, Helmholtz lhe propõe um desafio maior. No ano de 1879, a academia de Berlim oferecia um prêmio para verificação experimental da teoria de Maxwell. O problema consistia em estabelecer experimentalmente alguma relação entre forças eletromagnéticas e a polarização dielétrica de isolantes. Ou seja, de forma mais simples podemos colocar que o intuito era verificar se uma força eletromagnética surge da polarização de não-condutores ou essa polarização seria um efeito da indução magnética. Inicialmente, Hertz não aceitou trabalhar nesse desafio, mas, em um período posterior, tornou a estudá-lo, trazendo um desenvolvimento experimental muito importante para a elucidação desses problemas, segundo Shamos (op. cit.).

2.1.1 Do aparato experimental

Hertz (1893), não apresenta fotografias de seu aparato experimental e frequentemente os descreve por meio de figuras e esquemas. Para descrição de seu aparato,

[8] O físico alemão Wilhelm Eduard Weber foi inventor do primeiro telégrafo eletromagnético, juntamente com Gauss.

vejamos o esquema representado na Figura 01. Hertz utiliza dois condutores (1 e 2) que são colocados muitos próximos durante a realização do experimento. No esquema, as letras (a) e (b) indicam o sentido da corrente, que entra pela extremidade (a) do circuito e sai do sistema pela extremidade (b). Essas extremidades se conectam a duas placas metálicas (A) e (A´), entre as quais se introduz um bloco (B), de enxofre ou parafina. Hertz acreditava que, ao realizar o experimento, faíscas muito forte apareceriam nesse circuito secundário (2) e, quando esse bloco (B) fosse retirado, haveria redução considerável nesse número de faíscas. Entretanto, isso não foi verificado durante o experimento.

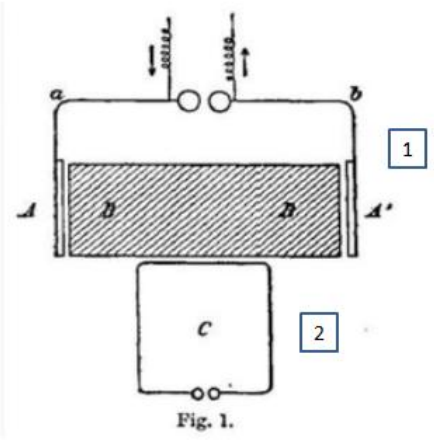

Figura 01: Representação do circuito utilizado por Hertz para produzir faíscas (HERTZ, 1893, p. 5. Alteração nossa)

Embora a descrição de seu aparato experimental, desenvolvido no trabalho original, seja relativamente simples, a falta de fotos ou boas ilustrações podem dificultar sua compreensão, por esse motivo, apresentamos uma foto atual do experimento, elaborado de forma sofisticada, mas, que é bastante fiel aquele desenvolvido pelo Hertz.

Figura 02. Representação do experimento desenvolvido por Hertz. Fonte: www.sparkmuseum.com (alteração nossa)

Analisando essa figura (02), podemos colocar que aparato experimental de Hertz era relativamente simples. De acordo com Hertz (1983) e Shamos (1987), esse era composto por um oscilador linear (1), constituído por duas esferas metálicas, cada qual possuía uma haste cuja extremidade continha outra esfera metálica, porém, em tamanho menor; além disso, ambas as hastes se ligavam por uma bobina de Rühmkorff[9]. Ao alimentar essa bobina com um circuito elétrico, oscilante, Hertz observou centelhas entre as esferas metálicas, estas centelhas deveriam produzir uma radiação eletromagnética, como havia sido preconizado por Maxwell, em 1865.

Para que a radiação pudesse ser detectada, Hertz utilizou um ressoador[10] (2), composto por um grosso fio de cobre circular e interrompido por um pequeno arco, tendo uma de suas extremidades uma pequena esfera e, na outra, um parafuso que podia avançar ou recuar para controlar a abertura do circuito. Quando este ressoador captava uma onda eletromagnética, centelhas elétricas saltavam entre a esfera e a ponta do parafuso. Como afirma Mangili (2012), o som e a aparência das faíscas indicavam se seu estado era satisfatório. No experimento, Hertz conseguiu produzir centelhas provenientes das descargas elétricas e manipulá-las. Desse modo, estudou seu comportamento em variadas situações, na tentativa de comprovar a teoria de Maxwell.

Movendo este dispositivo entre vários pontos do local onde realizava a experiência, Hertz pode calcular o comprimento de onda (a distância entre os pontos em que a intensidade das faíscas era bem maior) da radiação eletromagnética. Também, observou que, quando a esfera eletrizada negativamente era iluminada com luz ultravioleta, as centelhas surgiam mais facilmente. Mais tarde, esse fenômeno ficou conhecido como efeito fotoelétrico.

De acordo com Mangili (2012), o resultado esperado era que as centelhas produzidas sofressem alterações quando eram utilizados meios diferentes. Em seu experimento, observou que a faísca proveniente da superfície gerava uma segunda faísca nos osciladores. Desse modo, construiu um aparato para evitar a dispersão da luz, o que causou uma faísca secundária menos intensa, possibilitando a constatação de que isso era

[9]Em 1851, Henrich Ruhmkorff inventou o instrumento constituído, essencialmente, por duas bobinas, a primária (o indutor) e a secundária (o induzido), e por uma lâmina metálica que funciona como um interruptor. Com este dispositivo, é possível obter forças eletromotrizes elevadas, a partir de uma corrente contínua de baixa tensão e através de bruscas interrupções de corrente na bobina primária. Em suma, este aparelho funciona como um transformador.

[10] Receptor das descargas.

um fenômeno de natureza eletrostática[11] e que a luz ultravioleta era a responsável por tal fenômeno[12].

A partir de algumas variações no experimento, Hertz parece ter resolvido o problema proposto pela Academia de Ciência de Berlim, pois efetivamente controlava a criação das faíscas, conseguindo analisar seu comportamento ondulatório em meios diferentes, caracterizando a sua propagação e polarização, comparando-a com luz e concluindo a sua hipótese de que a luz era um fenômeno eletromagnético, de acordo com a teoria de Maxwell.

2.1.2 Algumas considerações

O nome de Hertz é constantemente citado quando se fala em efeito fotoelétrico. Seu trabalho é considerado por muitos como sendo a primeira verificação experimental para o que atualmente denominamos *efeito fotoelétrico*. De fato, este experimento permitiu a caracterização da propagação da onda, a polarização do meio e sua comparação com a luz. No entanto, fica aqui um questionamento: será que Hertz sabia que tinha descoberto o efeito fotoelétrico? Essa é uma questão que levanta algumas discussões, uma vez que, historicamente, existem alguns critérios que necessitam ser atendidos para que se possa realizar uma descoberta.

De acordo com Martins, (1999), existe uma série de critérios que deve ser atendidas para que se possa caracterizar a descoberta de um novo fenômeno, dentre essas, destacamos: a) o indivíduo deve comunicar sua descoberta; b) o indivíduo precisa se dar conta de que o fenômeno em questão é um fenômeno novo, para isso, ele deve comparar esse fenômeno com outros já existentes e notar diferenças importantes entre eles, se não consegue fazer isso, não se pode dizer que realizou uma descoberta; c) tem de conseguir identificar o que produz o fenômeno e ter condições de reproduzi-lo.

[11] De acordo com Shamos (1987), é conveniente destacar que as teorias elétricas existentes não se aplicavam para sistemas variáveis. Até aquele momento, não havia preocupação com efeitos eletrostáticos em circuitos fechados e estes não eram estudados.

[12] Como alerta Mangili (2012), Hertz utilizou este experimento para o estudo de polarização do meio e, assim, provar experimentalmente a teoria de Maxwell, ou seja, neste primeiro momento ele não atentava para existência do efeito fotoelétrico.

Para que possamos ter um melhor entendimento sobre as concepções de Hertz, a fim de verificar o que ele entendia a respeito do fenômeno que estava observando, vejamos então a seguinte colocação:

> Logo que comecei os experimentos, eu fui afetado por uma notável ação recíproca entre sparks[13] elétricas simultâneas. Eu não tive a intenção de permitir que esse fenômeno distraísse minha atenção do objetivo principal que eu tinha em mente; mas isso ocorreu de um modo tão definido e perplexo que eu não poderia completamente negligenciá-lo. (HERTZ, 1893, p. 4).

Com base nessa citação, acreditamos ser conveniente afirmar que Hertz não descobriu o efeito fotoelétrico como geralmente é defendido. Nossa afirmação decorre do fato de que Hertz não se detêm a estudar o fenômeno verificado e, como colocado no texto, ele não iria desviar-se de seu objetivo (comprovar experimentalmente as equações de Maxwell), para se dedicar-se a esse estudo. Em outra citação, Hertz (1893) reforça que:

> Assim que eu soube que estava lidando com um efeito da luz ultravioleta, eu coloquei de lado essa investigação, para então dirigir minha atenção para a questão principal mais uma vez. Entretanto, como certa familiaridade com o fenômeno é requerida na investigação das oscilações, eu publiquei um comunicado relatando esse fato (HERTZ, 1893, p.4).

Embora Hertz tenha observado experimentalmente o fenômeno e tenha fornecido grandes contribuições para seu estudo, percebemos que ele não o estudou, nem conseguia explicá-lo, até porque não era seu intuito. É comum que um cientista que esteja focado em investigar determinadas situações, ignore situações inesperadas ou que não façam parte do contexto que ele deseja investigar. Nesse sentido, tomando como base o artigo de Martins (1999), podemos dizer que é inconveniente atribuir a ele essa descoberta.

2.2 A hipótese do gatilho de Philipp Lenard

Lenard (1906) traz um tratamento diferente para o estudo dos raios catódicos. O físico húngaro-alemão foi assistente de Hertz em seu laboratório. Contudo, após a morte deste último, Lenard continuou trabalhando naquele local, sem dar continuidade aos

[13] Centelhas/ faíscas emitidas durante o experimento. (Tradução nossa)

trabalhos de Hertz. Ele estava mais interessado no estudo dos raios catódicos[14], nos tubos de Crookes[15]. Notadamente, não reproduziu fielmente as mesmas etapas seguidas por Crookes, achando ser mais conveniente fazer suas experiências com raios catódicos, isolando o fenômeno com o auxílio de fontes de interferência.

A pretensão de Lenard era estudar os raios catódicos fora do tubo (ao ar livre). Para que isso fosse possível, era necessário encaixar na parede do tubo uma vedação hermética, que permitiria a passagem dos raios. O físico utilizou o quartzo para realizar esse experimento, por ser o material mais adequado; assim, conseguiu transmitir as radiações com uma melhor qualidade. Considerou o teste como bem sucedido, pois, exceto no quartzo, não encontrou nenhuma espécie de fosforescência. Consequentemente, de acordo com Klassen (2009b), Lenard recebeu, no ano de 1905, o Prêmio Nobel por seu trabalho com raios catódicos.

2.2.1 O aparato experimental utilizado por Lenard

Para que tenhamos um maior conhecimento acerca do trabalho desenvolvido por Lenard, recorremos a um artigo publicado por ele em 1906, em que relata sobre o aparato experimental utilizado para o estudo do efeito fotoéletrico.

Conforme observamos na Figura 02, o aparato experimental era formado por um tubo de vidro, mantido a uma baixa pressão, produzido pelo tubo lateral de vácuo.

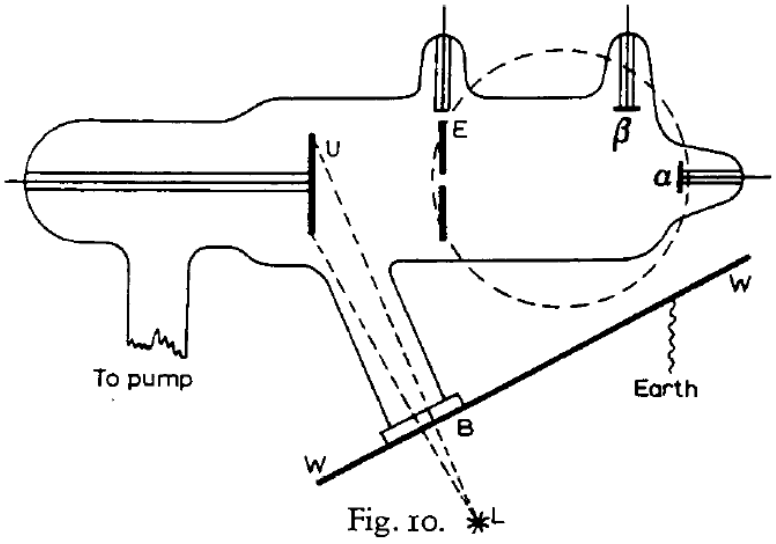

Fig. 10.

[14] Feixe de elétrons produzidos quando uma grande diferença de potencial é estabelecida entre dois eletrodos.
[15] William Crookes. Químico e físico inglês. Os tubos de Crookes são tubos de vidro com ar rarefeito.

Figura 03: Aparato experimental utilizado por Lenard (1906, p.122) para o estudo do efeito fotoelétrico.

O aparato continha um eletrodo de alumínio (U), iluminado por radiação ultravioleta proveniente de uma descarga em arco, originada em (L). A radiação emitida pela descarga em arco atravessava uma janela de quartzo (B) e atingia o eletrodo (U). Um anteparo (E) provido de um pequeno orifício era devidamente aterrado servindo como ânodo. Dois pequenos eletrodos metálicos, (α) e (β), eram conectados a eletrômetros, que mediam correntes de pequenas intensidades. Quando o eletrodo (U) era iluminado por radiação ultravioleta e polarizado negativamente, ocorria a ejeção de elétrons da superfície do eletrodo, sendo esses acelerados em direção ao ânodo (E). Alguns elétrons passavam através do orifício existente no ânodo e atingiam o eletrodo (α). Quando os elétrons eram defletidos por um campo magnético, oriundo de uma bobina de Helmholtz (representada na Figura 02 pelo círculo pontilhado) devidamente ajustada, o feixe de foto-elétrons atingia o eletrodo (β).

Primeiramente, Lenard investigou a relação existente entre a corrente que atingia o ânodo e a diferença de potencial (Diferença de potencial entre o catodo e o anodo π[16]) aplicada ao eletrodo (U); percebeu que não havia passagem de corrente para valores maiores que dois volts, ao passo que uma corrente de baixa intensidade era observada para valores menores que dois volts. Assim, concluiu que os elétrons não eram simplesmente liberados do cátodo, mas ejetados com uma energia cinética, suficiente para vencer a barreira do potencial de frenamento.

2.2.2 As considerações de Lenard sobre o efeito fotoelétrico

O trabalho do Lenard sobre o efeito fotoelétrico foi publicado em 1902, e apresentam as leis do efeito fotoeletrico, oriundas das experiências que haviam sido realizadas, concluindo que a velocidade máxima com que os elétrons são ejetados por luz ultravioleta independe da intensidade luminosa. Assim, convenceu-se de que não poderia haver transformação de energia luminosa em energia cinética, implicando dizer que os elétrons já possuiam certa velocidade, intitulada velocidade fotoelétrica, sendo essa equivalente ao potencial e à energia cinética. Com base nisso, argumentou que a energia luminosa incidente sobre a superficie metálica deveria provocar a liberação apenas dos

[16] Lenard não representa a diferença de potencial pela variável π. Contudo, a fim de uniformizar as variáveis utilizadas, estamos atribuindo essa denominação.

elétrons selecionados, não adicionando energia ao mesmo (LENARD, 1902). Essa conclusão ficou conhecida como a hipótese do gatilho de Lenard, que até meados do ano de 1911, servia como base para quase toda compreensão do efeito fotoelétrico, como discutido em Wheaton (1983).

De acordo com Klassen, (2009b), Lenard começou a investigar a natureza do efeito fotoelétrico ainda mais profundamente e descobriu que mesmo que os elétrons fossem emitidos, pois eram afetados pela intensidade da luz, nada acontecia com a energia cinética. Lenard então constatou que a energia dos elétrons dependia do comprimento de onda da luz incidente. Assim, a luz que possuisse comprimento de onda mais curto ejetava elétrons mais rapidamente.

No entanto, Lenard era incapaz de desenvolver condições experimentais adequadas para determinar qualquer variação do efeito. Basicamente, argumentou que uma vez que os elétrons são ejetados, sua energia deve ser originária de dentro do próprio átomo, então, tudo que ocorre é o desencadeamento da liberação de elétrons; ou seja, o próprio átomo possui essa energia internamente e a luz incidente funciona como um gatilho, liberando esse elétron. Visto que a estrutura do átomo não era conhecida até aquele momento, sua explicação foi razoável, mesmo que não fosse muito detalhada, como nos aponta Wheaton (1983) e Kuhn (1978).

Como apresenta Wheaton (1983), por meio desse trabalho, publicado em 1902, Lenard estabeleceu duas leis empíricas para explicar o fenômeno: **1)** os elétrons emitidos têm velocidades iniciais finitas e independentes da intensidade da luz incidente, porém dependem de sua frequência; **2)** o número total de elétrons emitidos é proporcional à intensidade da luz incidente.

2.2.3 Algumas considerações

Os trabalhos de Lenard de 1902 e 1906 são considerados grandes marcos para a evolução da Física, por contribuírem para os estudos acerca do efeito fotoelétrico. Como apontam Wheaton (1983) e Kuhn (1978), a hipótese do gatilho foi considerada por muito tempo como a explicação mais plausível para o fenômeno, sendo a hipótese mais aceita até mesmo após a publicação do trabalho de Einstein sobre o quanta de energia.

Um ponto importante que deve ser destacado se deve ao princípio físico adotado por Lenard. Na época em questão, a teoria ondulatória tinha forte influência na

comunidade científica, e foi utilizada como base para desenvolvimento de sua teoria. No entanto, as estruturas das leis estabelecidas se apresentavam incompatíveis com o eletromagnetismo clássico proposto por Maxwell, uma vez que quanto mais intensa a radiação eletromagnética, maior seria a energia cinética dos elétrons. Por esse motivo, não houve grandes críticas ao seu trabalho sobre a hipótese do gatilho, pois, não havia muito conhecimento sobre essa área. Logo, a hipótese foi considerada suficiente à época.

Mesmo obtendo êxito em seu trabalho, Lenard não permaneceu imune às críticas. Seu trabalho foi duramente criticado devido ao fato de sua hipótese desconsiderar a influência da temperatura para explicar o fenômeno, como nos apresenta Wheaton (1983). A ideia da influência da temperatura surge da suposição de que se o elétron possui uma determinada velocidade dentro do átomo, essa velocidade deveria ser aumentada caso houvesse o aumento de temperatura. No entanto, o aumento de velocidade não foi identificado, nem mesmo durante a verificação experimental por Millikan. Assim, todos aqueles que sugeriram essa relação falharam.

2.3 Einstein e a teoria dos quanta

O ano de 1905 ficou conhecido como o ano miraculoso de Einstein, por consequência de ter publicado, na famosa revista alemã *Annalen der Physik*, cinco importantes trabalhos que mudaram a face da física. Para esse tópico de nossa dissertação, nos dedicamos à análise do quinto trabalho, originalmente intitulado *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz). Para uma melhor compreensão dos pressupostos que levaram Einstein por esse caminho, além de seu artigo original, recorremos a outras referências (JAMMER, 1966; KUHN, 1978; SEGRÈ 1987, e WHEATON, 1983), para esclarecer algumas situações que fugiram à nossa compreensão.

No período em que Einstein escreveu esse trabalho, a hipótese do gatilho de Philipp Lenard estava fortemente consolidada e era considerada a explicação mais plausível para o que atualmente denominamos efeito fotoelétrico, como nos coloca Wheaton (1983). Einstein se sentiu instigado ao ver o trabalho do Lenard, mas, por outro lado, inquietou-se frente a essa teoria, que julgava inadequada. Desse modo, escreve o trabalho supracitado no intuito de apresentar um novo tratamento acerca da produção e

transformação da luz, além de refutar as hipóteses de Lenard. Para que possamos ter uma maior compreensão do trabalho realizado por Einstein, analisaremos detalhadamente seu artigo.

Nas primeiras páginas de seu trabalho, Einstein descreve algumas divergências existentes entre a teoria corpuscular e a teoria ondulatória e deixa evidente seu posicionamento favorável à teoria corpuscular. Segundo ele, na teoria da matéria (corpuscular), há a possibilidade de se especificar completamente um sistema por meio de um número finito de quantidades mecânicas, o que não ocorre com a teoria eletromagnética (ondulatória). O físico admite que a teoria ondulatória é eficiente para descrever fenômenos puramente ópticos (reflexão, interferência, entre outros dessa natureza). No entanto, se temos situações em que precisamos considerar a interação entre luz e matéria, não faz sentido considerar essa energia (luz) como sendo ondulatória, pois com essa suposição, não se pode explicar fenômenos em que haja a emissão e absorção de luz.

Einstein sugere que, para explicação de alguns fenômenos, como é o caso da radiação de corpo negro, fluorescência**,** produção de raios catódicos por luz ultravioleta, entre outros, é conveniente adotar que a energia luminosa esteja distribuída de forma descontínua no espaço. A partir dessas considerações, a ideia de átomos de energia localizados – os quanta de energia – passa a tomar uma maior dimensão em seu trabalho. Essa consideração foi uma proposta bastante ousada, não apenas por representar um novo conceito, mas, também, por assumir uma propositura que rompia com as ideias da Física Clássica, invalidando as equações de Maxwell para sua teoria, que, como sabemos, apresentava uma base fortíssima para explicação dos fenômenos eletromagnéticos da época.

Ao romper com as ideias clássicas, não faria sentido utilizar as de Maxwell para estruturar sua teoria. Assim, Einstein recorre à lei de W. Wien para fundamentar seu trabalho. Notadamente, o estudo de Wien consistia na verificação da distribuição do comprimento de onda da radiação de uma cavidade térmica, que supunha que quando o volume de um gás sofresse variações, o comprimento de onda deveria mudar por efeito Doppler. Nesse sentido, Wien ainda considerou que quando o volume de determinada substância variasse de modo adiabático, ou seja, sem que houvesse trocas de calor com o ambiente externo, a sua temperatura e a frequência deveriam variar de forma proporcional entre si.

Nesse sentido, Einstein admite que radiação monocromática de baixa densidade (dentro dos limites de validade da fórmula da radiação de Wien) comporta-se termodinamicamente como se ela consistisse em quanta de energia mutuamente independente de magnitude $\frac{R\beta\nu}{N}$.

2.3.1 Einstein e o valor da energia do quantum

Nesse tópico, buscamos uma compreensão um pouco mais aprofundada acerca do quantum de energia. Para isso, procuramos além de um melhor entendimento do significado de cada equação, descrever de forma breve, mas suficientemente detalhada as suposições feitas por Einstein, e a base matemática adotada para estrutura-las[17].

Inicialmente, Einstein (1905) considera um espaço encerrado por paredes completamente refletoras contendo muitos elétrons e moléculas de gás que se movem livremente e exercem forças conservativas entre si quando estão muito próximas. Essas moléculas e elétrons podem colidir uns com os outros, como comumente ocorre com as moléculas (segundo a teoria cinética dos gases). Dentro desse sistema, há uma grande quantidade de elétrons ligados a pontos bem separados no espaço por forças proporcionais às distâncias que os separam. Esses elétrons ligados participam de interações conservativas com moléculas e com os elétrons livres, quando esses últimos estão mais próximos, são os chamados elétrons "ressonadores", que emitem e absorvem ondas eletromagnéticas de períodos definidos, que a radiação no volume considerado é idêntica à radiação de corpo negro.

Como já foi mencionado anteriormente, Einstein fundamenta suas equações com base na teoria de radiação de corpo negro de Wien. Um fato importante que deve ser destacado refere-se à sua validade. Como nos é colocado por Wheaton (1983), a lei de Wien servia apenas para situações em que se está trabalhando com altas frequências e/ou baixas temperaturas. Portanto, a teoria do Einstein deveria ser aplicada nas mesmas condições. De acordo com a teoria de Wien, a densidade de energia no intervalo de frequência $d\nu$ é:

[17] Vale salientar que as equações apresentadas no trabalho original são bastante diretas e não explicitam as relações feitas. Nesse sentido, as equações apresentadas em nosso trabalho é uma adaptação nossa, e foi desenvolvida com o auxílio do Segrè (1987).

$$\mathrm{du} = \alpha\nu^3 \, \mathrm{e}^{\frac{-\beta\nu}{\mathrm{T}}} \, d\nu \tag{1}$$

Einstein explica os fenômenos da radiação por luz ultravioleta, calculando, a partir da Equação (1), a variação de entropia da radiação do corpo negro, assemelhando a densidade de entropia e densidade de energia supondo uma variação de volume.

Tomando $\beta = \frac{h}{\mathrm{k}}$, a Equação (1), torna-se:

$$\mathrm{du} = \alpha\nu^3 \, \mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{h}\nu}{\mathrm{kT}}} \, d\nu$$

ou ainda

$$du = \rho\ \nu, T\ d\nu \tag{2}$$

Onde

$$\rho\ \nu, T\ = \alpha\nu^3 e^{\frac{-h\nu}{kT}} \tag{3}$$

Sendo $\rho\ \nu, T\ d\nu$, a densidade de energia com frequência entre $\nu\ e\ \nu + d\nu$ variando de um volume inicial V_0 a um volume final V.

Einstein descreve sua teoria com base em uma analogia entre a densidade de entropia $\Phi\ \nu, T\ d\nu$ e a densidade de energia $\rho\ \nu, T\ d\nu$. De acordo com Segrè (1987), fazendo essa relação, ele pretende investigar como essa função Φ pode ser obtida partindo da lei de radiação do corpo negro. Assim, com base em suas colocações, pode-se dizer que [18]:

$$\frac{\mathrm{d}\Phi\ \nu,\mathrm{T}}{\mathrm{d}\rho\ \nu,\mathrm{T}} = \frac{1}{\mathrm{T}} \tag{4}$$

Partindo da Equação (3), encontramos:

$$\Longrightarrow \mathrm{e}^{\frac{-\mathrm{h}\nu}{\mathrm{kT}}} = \frac{\rho\ \nu, \mathrm{T}}{\alpha\nu^3}$$

[18] Para isso, ele parte da relação: $dS = \frac{1}{T} dE$, em que esse dE é a quantidade de calor adicionada ao processo, podendo ser representada também por dQ.

$$\Rightarrow \frac{-h\nu}{kT} = \ln \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3}$$

$$\frac{1}{T} = -\frac{k}{h\nu} \ln \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3} = \frac{d\Phi}{du} \tag{5}$$

Então, substituindo este resultado em (5) e integrando, chegamos a:

$$\Phi = -\frac{k}{h\nu} \quad ln \ \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3} \quad du$$

$$= -\frac{k}{h\nu} \ uln \ \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3} \ - u \ + C$$

$$\Phi = -\frac{ku}{h\nu} \ ln \ \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3} \ - 1 \tag{6}$$

Tendo encontrado a densidade de entropia (Φ), Einstein busca descrever um valor para entropia (S) [19]. Para isso, ele faz a seguinte argumentação.

Considere-se a radiação que ocupa um volume V. Admitimos que as propriedades observáveis dessa radiação fiquem completamente determinadas quando a densidade de radiação de frequências distintas pode ser considerada separáveis umas das outras sem que se realize qualquer trabalho ou transferência de calor, a entropia de radiação pode se representada por $S = \Phi\ \nu, T\ V$. Einstein consegue deduzir a entropia da radiação para uma energia constante, dentro de uma faixa de frequência dν contida em um volume de gás que se expande de um volume inicial (V_0) a um volume final (V) (SEGRÈ, 1987). Dessa maneira, analisando separadamente a equação (7), podemos deduzir que para um dado volume V, com entropia S, teremos:

$$S = \Phi\ \nu, T\ V \Rightarrow S = -\frac{k\rho}{h\nu} \ \ln \ \frac{\rho\ \nu, T}{\alpha\nu^3} \ - 1 \ + C \ \ V \tag{6}$$

[19] A variável dS que aparece em seu trabalho não é a variação de entropia total do sistema, mas, é uma variação de entropia que está limitado em um volume específico e dentro de uma faixa de frequência também determinada, que vai de ν até ν + dν .

$$\Longrightarrow S = -\frac{K\rho V}{h\nu} \ \ln \ \frac{\rho}{\alpha V \nu^3} \ -1 \ + \mathrm{C} \tag{7}$$

Supondo que a energia de radiação total permanece constante, ele admite que $\rho \ \nu, T \ d\nu = U = \ \nu, T \ V$, assim:

$$S = -\frac{KU}{h\nu} \ \ln \ \frac{U}{\alpha V \nu^3} \ -1 \ + \mathrm{C} \tag{8}$$

Para $V = V_{0,}$ temos:

$$S_0 = \ -\frac{kU \ \nu.T}{h\nu} \ \ln \ \frac{U \ \nu.T}{\alpha V_0 \nu^3} \ -1 \ + C \tag{9}$$

Portanto, partindo dessa variação de volume, podemos dizer que:

$$S - \ S_0 = \ -\frac{kU(\nu.T)}{h\nu} \ \ ln \ \frac{U(\nu.T)}{\alpha V \nu^3} \ -1 - \ \ln \ \frac{U(\nu.T)}{\alpha V_0 \nu^3} \ -1$$

$$S - \ S_0 = \ +\frac{kU(\nu.T)}{h\nu} \ -ln \ \frac{U(\nu.T)}{\alpha V \nu^3} \ + \ \ln \ \frac{U(\nu.T)}{\alpha V_0 \nu^3}$$

Logo:

$$S - \ S_0 = \frac{kU(\nu.T)}{h\nu} \ln \ \frac{V}{V_0} \tag{10}$$

Tomando novamente $\beta = \frac{h}{\mathrm{k}}$, teremos:

$$S - \ S_0 = \frac{U(\nu.T)}{\beta\nu} \ln \ \frac{V}{V_0} \tag{11}$$

A equação (11) nos mostra uma relação entre a entropia da radiação monocromática, de densidade suficientemente baixa (gás ideal) e com o volume de

moléculas ou elétrons. Após essa verificação feita por Einstein, passa-se a utilizar-se a ideia de gás ideal, já que se supõe que essa entropia de radiação se comporta de mesmo modo que um gás ideal. Utilizando-se do princípio de Boltzmann, Einstein (1905) consegue deduzir a mesma expressão (11), aplicando probabilidade à entropia.

Levando em consideração a relação de dependência entre a entropia e o volume dos gases, Einstein recorre à probabilidade estatística para eliminar algumas dificuldades encontradas ao trabalhar com o princípio de Boltzmann, embora não explicite quais foram essas dificuldades. Obviamente, convém mencionar que Einstein não aborda uma linguagem puramente estatística para tratar os dados, mas cria uma aplicação mais geral que se limita a solucionar alguns casos especiais. Desse modo, ele supõe que cada aumento da densidade de entropia (σ) pode ser concebido como uma transição para um estado de probabilidade mais alto, portanto, uma dada entropia S_1 de um sistema é uma função da probabilidade W_1 de seu estado instantâneo. Contudo, se tivermos dois sistemas S_1 e S_2 que não interagem entre si, podemos dizer que:

$$S_1 = \sigma_1(W_1)$$
$$S_2 = \sigma_2(W_2)$$

No entanto, se estivéssemos tratando esses dois sistemas como um único sistema, com entropia S e probabilidade W, teríamos:

$$S = S_1 + S_2 = \sigma(W_1 . W_2) \qquad (12)$$

Portanto, a entropia pode ser definida pela soma de entropia de cada sistema (S_1 e S_2), porém a probabilidade total W não pode ser determinada por uma soma de probabilidades, mas deve ser entendida como: $W = W_1 . W_2$, que nos mostra que os dois sistemas são eventos independentes um do outro. Logo, temos que:

$$\sigma(W_1 . W_2) = \sigma_1(W_1) + \sigma_2(W_2)$$

Utilizando-se uma das propriedades de logaritmo, temos:

$$\ln (W) = \ln (W_1) + \ln (W_2); \qquad \text{onde; } W = W_1 . W_2 \qquad (13)$$

Finalmente, ele coloca que:

$$\sigma_1(W_1) = C \ln (W_1) + B \quad (14)$$

$$\sigma_2(W_2) = C \ln (W_2) + B \quad (15)$$

$$\sigma(W) = C \ln (W) + B \quad (16)$$

Grosso modo, não encontramos informações mais detalhadas acerca das constantes utilizadas. O próprio Einstein se restringe a dizer que essa constante C[20] é uma constante universal, que provém da teoria cinética dos gases, cujo valor é $\frac{R}{N}$, em que o R é a constante dos gases e o N é o número de Avogadro. No entanto, com base nas concepções que temos atualmente, podemos colocar que a constante é adimensional e necessária para descrever a densidade de entropia.

Se considerarmos S_0 como sendo a entropia de um estado inicial e S como sendo a entropia do estado final, temos que a probabilidade W relativa a essa variação deve ser expressa como sendo:S

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W - \ln W + B - B_0 \quad (17)$$

Considerando $B - B_0 = 0$, temos:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \frac{W}{W_0} \quad (18)$$

Considerando uma situação em que haja n partículas, temos as seguintes possibilidades:

Volume V – O número de configurações possíveis é $V^n \Longrightarrow W = V^n$

Volume V_0 – O número de configurações possíveis é ${V_0}^n \Longrightarrow W_0 = {V_0}^n$

Desse modo, a partir da hipótese adotada, diz-se que a probabilidade de que um desses pontos esteja em um volume V menor do que V_0 é de $\frac{V}{V_0}$, então a probabilidade de que todos os n pontos estejam ao mesmo tempo nesse volume V será dado por:

[20] Essa constante C é a constante de Boltzmann (k) usada atualmente, que também representa $\frac{R}{N}$.

$$\frac{W}{W_0} = \frac{V}{V_0}^{n} \tag{19}$$

Portanto, a partir dessa expressão, se consideramos certo número n de pontos materiais (partículas) que se movem ao acaso e sem interações entre si, ocupando inicialmente um volume V_0 e, posteriormente, passando a ocupar um volume V, então a variação de entropia será dada por:

$$S - S_0 = R\frac{n}{N}\ln\frac{V}{V_0} \tag{20}$$

Assim, aplicando a expressão formulada por Boltzmann, obtém-se uma relação entre a variação de entropia e a variação de volume, que pode ser expressa da seguinte forma:

$$S - S_0 = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{N}}\ln\frac{\mathrm{v}}{\mathrm{V_0}}^{\mathrm{n}} = \mathrm{R}\frac{\mathrm{n}}{\mathrm{N}}\ln\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{V_0}} \tag{21}$$

As equações 11e 20 apresentam estrutura semelhante entre si, então, é possível compará-las, como pode ser percebido nos livros Wheaton (1983) e Kuhn (1978). Desse modo, faz-se a seguinte colocação:

$$\mathrm{R}\frac{\mathrm{n}}{\mathrm{N}} = \frac{\mathrm{U}}{\beta\nu} \tag{22}$$

Portanto,

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{R}}.\frac{\mathrm{U}}{\beta\nu} \tag{23}$$

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{U}}{\frac{\mathrm{R}\beta\nu}{\mathrm{N}}} \tag{24}$$

Logo:

$$\mathrm{U} = \frac{\mathrm{R}\beta\nu}{\mathrm{N}} \tag{25}$$

Desse modo, a radiação monocromática, com uma dada frequência ν e energia total U, pode ser interpretada como um conjunto de partículas n. Esses números de quanta

de energia são proporcionais à energia total, e, considerando n = 1, podemos afirmar que cada quantum corresponde a uma energia $\frac{R\beta\nu}{N}$. Com isso, Einstein assume que:

> A radiação monocromática de baixa densidade (dentro dos limites de validade da fórmula da radiação de Wien) comporta-se termodinamicamente como se ela consistisse em quanta de energia mutuamente independente de magnitude $\frac{R\beta\nu}{N}$. (EINSTEIN, 1905, p.97).

Com base em Wien, Einstein mostrou que a expressão para dependência volumétrica da entropia da radiação, dentro dos limites de uma determinada frequência, tem forma similar à entropia de um gás ideal, concluindo que a radiação monocromática de baixa densidade se comporta termodinamicamente como sendo constituída de quantum de energia de magnitude $\frac{R\beta\nu}{N}$ (Onde R é a constante dos gases, N é o numero de Avogadro, β é uma constante e ν é a frequência), como nos aponta Stachel (2005). Ou seja, a ideia de Einstein foi explorar uma analogia que descobriu entre as expressões da entropia para a radiação emitida por um corpo negro (não dos osciladores como pensou Planck), no limite de validade da lei de Wien, e da entropia de um gás dada pela teoria cinética (JAMMER, 1966).

2.3.2 As considerações de Einstein sobre o efeito fotoelétrico

De acordo com Einstein (1905), a produção de raios catódicos por luz ultravioleta (ou efeito fotoelétrico) ocorre quando um quantum de energia incide sobre uma superfície metálica, penetrando-a e cedendo sua respectiva energia para o elétron, que a transforma em energia cinética[21]. Em um processo mais simples, é concebível que um quantum de luz forneça toda sua energia a um único elétron. No entanto, Einstein não descarta a possibilidade de que seja transferida apenas uma parte dessa energia do quantum para elétron. Após essa transferência de energia, o elétron se desloca no interior do metal, consumindo parte dessa energia até atingir a sua superficie, de onde deverá ser ou não

[21] De acordo com Stenio Dore (2004), podemos compreender como incorreto admitir que o elétron absorva a energia do fóton. Levando em consideração que o elétron é uma partícula elementar sem estrutura interna, essa absorção não é possível. Desse modo, o que ocorre é um processo de transferência de energia e não absorção.

ejetado. Nesse percurso de saída do elétron de seu ponto inicial até o ponto de onde ele é ejetado, ele realiza um trabalho P, expresso por:

$$\frac{R}{N}\beta\nu - \mathrm{P} \tag{25}$$

É nesse ponto que reside uma importante consideração de Einstein sobre o fenômeno. Einstein afirma que a ejeção do elétron ocorre de maneira instantânea, caracterizando, assim, o efeito como sendo de natureza quântica. Os trabalhos anteriores admitem a ejeção de elétrons de forma clássica, uma vez que há um intervalo de tempo desde a transferência da energia até a ejeção do elétron. Se o corpo metálico é carregado com um potencial π e é circundado por condutores, de potencial zero, e se esse potencial é apenas suficiente para impedir a perda de carga elétrica por parte desse corpo, segue-se que:

$$\pi\epsilon = \frac{\mathrm{R}}{\mathrm{N}}\beta\nu - \mathrm{P} \qquad \epsilon \text{ é a carga do elétron} \tag{26}$$

Em que, πϵ equivale ao que atualmente adotamos como sendo $E_{máx}$ que é a energia máxima dos fotoelétrons; $\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{N}}\beta$ é o que nos dias atuais equivale à constante de Planck (h) [22]; o ν é a frequência da radiação incidente e o P é a função trabalho, que é uma função característica do material, ou seja, varia de um metal para outro.

Einstein conclui que, se sua fórmula estiver correta, graficamente, a função entre o potencial π [23] e a frequência da luz incidente deve fornecer uma linha reta, cuja inclinação é independente da natureza da substância analisada, isto é, ele admite a proporcionalidade entre a energia cinética dos elétrons ejetados com a frequência da luz incidente.

2.3.3 Algumas considerações

Analisando detalhadamente o artigo de Einstein, podemos perceber que existem algumas distorções comumente divulgadas sobre sua teoria. Um primeiro equívoco se refere ao fato de considerar o trabalho de 1905 como uma explicação para o efeito

[22] Embora Einstein não tenha feito essa comparação.
[23] Potencial de corte

fotoelétrico, apenas. Einstein pretendia dar uma explicação sobre a emissão e transformação da luz de maneira mais geral[24]. Em seu trabalho, analisa três interações da luz com a matéria, tratadas sob a forma de quanta de energia: a regra de Stokes para fluorescência; a ionização dos gases pela luz ultravioleta e o efeito fotoelétrico, como afirma Stachel (2005).

Outro comentário comumente encontrado se refere ao fato de atribuir a Einstein a primeira elaboração de uma teoria dualística[25], que teria sido utilizada para explicar o efeito fotoelétrico. Como pudemos perceber ao longo desse trabalho, isso também não é verdade. Einstein (1905) escreve um trabalho puramente corpuscular. Obviamente, devemos salientar que Einstein não descarta a teoria ondulatória, reconhecendo que seu uso é válido e eficiente para estudar fenômenos ópticos. No entanto, para a estruturação desse artigo, ele trata a luz como sendo constituída unicamente por partículas e, em momento nenhum, assume a luz como tendo característica dual, como argumenta Martins (2014).

Uma inconsistência encontrada nas referências diz respeito às nomenclaturas utilizadas. O termo *efeito fotoelétrico* não aparece ao longo do artigo, pois, para Einstein, era denominado: *raios catódicos gerados por ultravioleta*. Análogo ao que acontece com o termo *fóton,* introduzido a partir de 1926 por Gilbert Lewis. Até então, Einstein utiliza apenas o termo *quantum de energia*, como nos revela Klassen (2009b).

2.4 Millikan e a verificação experimental para o efeito fotoelétrico

De acordo com Wheaton (1983), os fenômenos da fotoeletricidade foram parcialmente elucidados em Lenard (1902), com a apresentação de que a luz de curto comprimento de onda, ao incidir sobre um metal, faz com que haja a ejeção de elétrons. Este fenômeno desafiou e contestou completamente qualquer explicação que pudesse ser dada pela Física Clássica, permanecendo sem explicações mais aprofundadas até 1905, ano que Albert Einstein publica um artigo em que descreve uma nova teoria para emissão e

[24] Levando-se em consideração que qualquer fenômeno sobre transformação e absorção de luz não podia ser explicada por ela, pois, só tinha validade para radiação de alta frequência e baixa densidade.

[25] A questão da dualidade ainda é controversa. Quando Einstein utiliza a teoria corpuscular, sem, no entanto descartar a validade da teoria ondulatória, ele abre um precedente para que se possa argumentar sobre seu posicionamento favorável a uma dualidade, embora em nenhum momento ele utilize esse termo. Para alguns pesquisadores, Einstein traz uma ideia, que embora embrionária, é o que hoje tratamos de dualidade. Para outros, não faz sentido falar em dualidade como uma teoria de Einstein, pois, seu trabalho não é dual e ele utiliza uma descrição para o fenômeno puramente corpuscular.

absorção da luz. Nessa teoria, admitiu que a luz era constituída por partículas indivisíveis, que estavam localizadas aleatoriamente no espaço; os quanta de energia – que atualmente chamamos *fótons*. A concepção de quantum de energia serviu para explicar de forma mais simples o fenômeno em questão, levando Einstein a escrever a famosa equação fotoelétrica, que estabelecia uma relação entre o potencial π [26] e a frequência ν da luz incidente.

A partir da publicação do artigo de 1905, várias outras tentativas de explicar os fenômenos aqui discutidos, em especial o *efeito fotoelétrico*, passaram a fazer parte do contexto acadêmico da época. Por se tratar de um trabalho heurístico, este artigo produziu uma revolução no pensamento científico da época, uma vez que inseria um aspecto corpuscular para luz, partindo de pressupostos baseados em sua própria experiência e contrariando os fortes argumentos já definidos no modelo ondulatório clássico, previsto e comprovado, como discutido em Jammer (1966).

Inicialmente, a grande maioria dos artigos publicados a partir de 1905 sinalizava em oposição à teoria de Einstein, refutando-a em função da concepção dada por Planck à interação radiação/matéria. Como exemplo, podemos citar os discursos de Planck e outros cientistas sobre Einstein, quando este foi indicado à Academia Prussiana de Ciências, em 1913. Segundo Jammer (1966, p. 43), ao descrever o perfil do indicado, os cientistas apontaram-lhe diversas contribuições à ciência, apesar de em alguns casos, a exemplo da hipótese de quanta de luz, ter perdido o alvo.

Como é destacado no título do artigo de Einstein, esse trabalho é uma análise heurística, sem referências ou comprovações experimentais, partindo basicamente de suas concepções. Desse modo, atribuímos sua baixa aceitação a essa condição, pois ele apresentou uma proposta que rompia com os princípios clássicos de forte embasamento teórico para se fundamentar em suposições que não tinham nenhuma verificação experimental que pudesse descrever melhor o experimento, o que consequentemente dificultava sua aceitação. Portanto, uma possível explicação para essa rejeição é o fato de que a ideia de quantum de energia parecia mais misteriosa do que o próprio efeito fotoelétrico, como foi apontado em Du Bridge; Epstein (1959).

[26] Millikan representa o potencial (chamado por ele de potencial de frenamento) pela variável (V), contudo, para trazer uma uniformização de variável para facilitar a compreensão, utilizamos a variável (π) para descrever esse potencial em todas as situações.

Como muitos físicos discordaram de sua teoria e tentaram refutá-la, ela foi testada independentemente por vários investigadores, como foi o caso de Pohl e Pringsheim[27], J.J. Thomson[28], Ramsauer[29], Ladenburg[30], Otto Stuhlman e Owen Richardson[31], entre outros. No entanto, seus trabalhos não obtiveram o êxito esperado, pois não chegaram a resultados que pudessem verificar experimentalmente essa teoria, nem refutá-la, como discutem Wheaton (1983) e Du Bridge; Epstein (1959). As primeiras comprovações para o efeito fotoelétrico foram realizadas por A.L. Hughes no ano de 1912 e, posteriormente, por O.W. Richardson e K.T. Compton (JAMMER 1966, p.35). Todavia, as equações de Einstein não foram validadas pelos trabalhos realizados por esses pesquisadores, tendo sua confirmação exata com os trabalhos publicados por Millikan, ou seja, apenas os trabalhos de Millikan, desenvolvidos entre os anos de 1914 e 1916, como é colocado por Kuhn (1978, p.222), conseguiram descrever experimentalmente uma situação que corretamente se adequavam às equações de Einstein.

As primeiras publicações de Millikan sobre a fotoeletricidade foram feitas em conjunto com G. Winchester, como afirma Du Bridge; Epstein (1959) e Millikan, (1916). Ainda de acordo com esses autores, pode-se destacar que o objetivo foi investigar se a corrente fotoelétrica e a potencial limitação[32] dependiam da temperatura do metal

[27] Em 1910 Robert Pohl e Peter Pringsheim identificaram que existiam dois tipos de efeitos. O primeiro seria o efeito normal e o segundo um efeito "seletivo". Ambos observaram que a emissão de elétrons era máxima para certas frequências de radiação, ou seja, dependiam do material. Desse modo, esse efeito não poderia existir de acordo com a hipótese de Einstein, do quantum de luz. (WHEATON, 1983, p. 188)..

[28] J.J. Thomson desenvolveu um trabalho experimental no intuito de refutar a hipótese do gatilho de Lenard (WHEATON, 1983, p. 136)..

[29]Ramsauer estudou juntamente com Lenard a ação da luz ultravioleta nos gases no ano de 1910. Nesse período, surgiram fortes dúvidas sobre ao que desencadeava o fenômeno. Eles mostraram que a maior parte da ejeção dos elétrons era devido à absorção de impurezas, que era misturada a sua amostra de gás. Com isso, conclui-se que no caso dos gases, como para sólidos e líquidos, o efeito fotoelétrico é correlacionada não apenas com a absorção [de luz], mas com a absorção muito forte de impurezas do metal (WHEATON, 1983, p. 177-179). Nesse ponto destacamos que, em 1910, grande parte dos experimentos ainda se dirigia como uma tentativa de confirmar a hipótese de Lenard.

[30] Erich Ladenburg relatou, no ano de 1907, o resultado de experimentos realizados com radiação ultravioleta. Verificou que a radiação produzia elétrons com um contínuo de velocidades e que a velocidade máxima dos elétrons aumentava com a frequência de radiação incidente; com isso, considerou que essa era uma explicação para a hipótese do gatilho (WHEATON, 1983, p. 136)..

[31] Em 1910, Otto Stuhlman e Owen Richardson estudaram a emissão de elétrons por um fino filme de platina depositado sobre uma placa de quartzo. Quando a luz incidia sobre essa placa, ela era emitida no mesmo sentido em que a luz incidia, bem como em sentido oposto (como se estivessem sendo refletidos). Isso mostrou que o efeito fotoelétrico não poderia ser explicado pela teoria do s quanta de luz proposta por Einstein. Em 1914, Owen Richardson conseguiu deduzir a mesma equação de Einstein sem utilizar a ideia de quantização; utilizou essa mesma suposição para explicar a emissão termoiônica, trabalho com o qual recebeu o prêmio Nobel em 1928 (WHEATON, 1983, p. 193, 235-238).

[32] Millikan usa constantemente os termos potencial de frenamento e potencial limitação, contudo, ambos representam o que atualmente denominamos de potencial de corte.

emissor[33]. Essa dependência não foi encontrada, como nós conhecemos hoje, por causa do estado degenerado de elétrons do metal. Sendo essa hipótese comprovada inconsistente, decidiu partir de um segundo pressuposto.

2.4.1 Desenvolvimento experimental

Millikan inicia suas novas atividades com considerações acerca da validade da equação fotoelétrica de Einstein e da hipótese do quanta de luz. No artigo de Einstein de 1905, destacamos a hipótese de que a energia com que um elétron é expulso de um metal, por luz ultravioleta ou raios X, independe da intensidade da luz, mas depende da sua frequência. Essa hipótese é duramente criticada por Millikan, porque a aceitação dessa ideia exigiria algumas modificações na teoria clássica, como pode ser percebido em Millikan (1916). Assim, a energia máxima de emissão de corpúsculos sob a influência da luz seria dada pela equação:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \pi\epsilon = h\nu - P \tag{26}$$

Em que hν seria a energia absorvida pelo elétron, P o trabalho necessário para "arrancar" o elétron do metal e $\frac{1}{2}mv^2$, a energia com que o elétron deixava a superfície. Essa energia era medida pelo produto da sua carga e pelo potencial $\pi\epsilon$ (Orginalmente descrito com V.e)[34]. Nesta época, não havia nenhum experimento disponível para determinar qualquer coisa sobre esse potencial.

Millikan (1916) aponta que há uma série de hipóteses que deveriam ter sido testadas experimentalmente, pois, se tomarmos como base a equação fotoelétrica, apenas a ideia de que para cada frequência existe um valor crítico que determina a velocidade máxima para a emissão de corpúsculos havia sido testada. A ideia de que há uma relação linear entre o potencial de corte e a frequência, ou a afirmação de que, graficamente, a inclinação da reta para um gráfico de V x ν, seria numericamente igual a h/e, não havia

[33] De acordo com Wheaton (1983), essa hipótese já havia sido testada por Lenard e também não obteve êxito.
[34] O potencial de corte era a diferença de potencial dentro do fototubo que obriga o fotoelétron mais energético a parar. (Potencial de frenagem)

passado por teste experimental rigoroso que pudesse fornecer resultados experimentais mais precisos.

No que se refere ao aparato experimental, podemos assumir que ele era simples, porém, bem engenhoso. De acordo com Millikan (1916), conforme podemos visualizar um esboço do aparato utilizado, apresentado na Figura 03. Seu experimento era realizado em um tubo no vácuo. Em seu interior, havia três blocos cilíndricos (1, 2 e 3), compostos de sódio, lítio e potássio; esses blocos conseguiam girar no interior do tubo com o auxílio de eletroímãs. O experimento consistia em fazer incidir radiação[35] de determinadas frequências sobre cada um dos blocos. Essa radiação era fornecida por meio de uma lâmpada de mercúrio, colocada no tubo na região intitulada (4). Para cada frequência que incidia sobre o bloco metálico era medido o potencial necessário para ejetar elétrons. O potencial era medido com o auxílio de um voltímetro e a ejeção dos elétrons era detectada por uma placa metálica, representada no esboço pela letra (S).

Acredita-se que a precisão dos trabalhos de Millikan se deva à sua habilidade em estudar efeitos dessa natureza e seu cuidado na obtenção dos dados. Nesse esboço, notamos que há (na parte mais estreita do tubo), fixada no aparato F, um sistema interessante, responsável pelo sucesso dos trabalhos de Millilkan. Esse sistema foi colocado no tubo para que uma faca (K) pudesse avançar e retroceder constantemente, para raspar a superfície do metal (dos blocos cilíndricos), obtendo superfícies sempre "frescas" (recém-raspadas), melhorando consideravelmente os resultados obtidos.

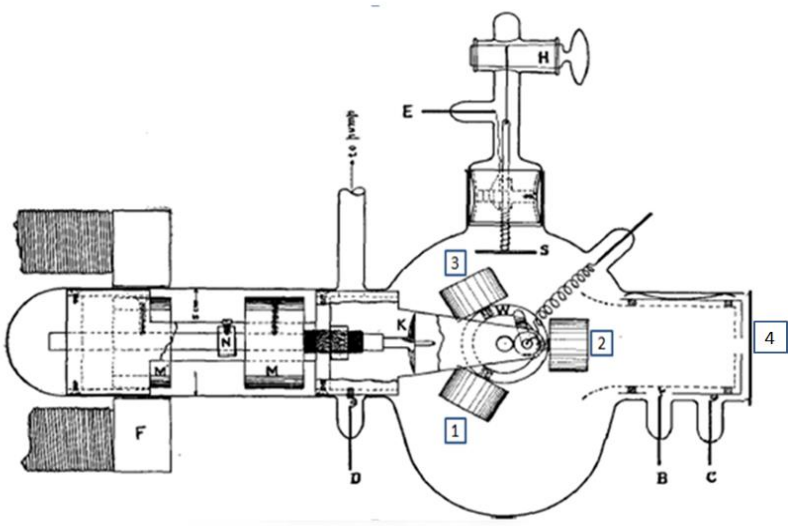

Figura 04: *Esboço do aparato experimental utilizado por Millikan* (1916, p.362).

[35] Essa radiação era obtida por meio de uma lâmpada monocromática de mercúrio.

Millikan (1916) nos passa a impressão de que ele era profundo conhecedor dessa equação e das teorias que a envolvia, porém, na verdade ele não tinha muita habilidade para trabalhar com ela, pelo menos no período inicial. Quando conseguiu traçar pontos que deveriam ser investigados na equação, dirigiu seus esforços para testá-las e o seu progresso foi rápido, como apresentam Du Bridge; Epstein (1959). Para esse teste, ele realizou alguns procedimentos específicos que serão discutidos a seguir.

Em primeiro momento, com a utilização desse aparato, ele buscou determinar o foto potencial, que ele define como sendo uma corrente gerada pela ejeção de fótons. Para isso, aplicou um potencial de corte, conseguindo parar apenas uma parte dos elétrons. Os elétrons que conseguiam "fugir" poderiam ter sua corrente medida. Ele buscava investigar se havia relação entre a intensidade da corrente dos elétrons ejetados e o potencial de corte. Após variações nesse potencial, era possível traçar um gráfico para comparar a variação de corrente com a variação de potencial, desse modo, era possível determinar por extrapolação gráfica o ponto em que a corrente desaparece completamente, o que corresponde ao foto-potencial. Para esse experimento, ele analisa a curva inteira, levando-se em consideração cada ponto, enquanto o metal é iluminado com alguns espectros luminosos de frequência constante ν (MILLIKAN, 1916).

Como resultado desses testes experimentais, Millikan obteve importantes resultados, conforme observamos nos gráficos mostrados nas Figuras 05 e 06:

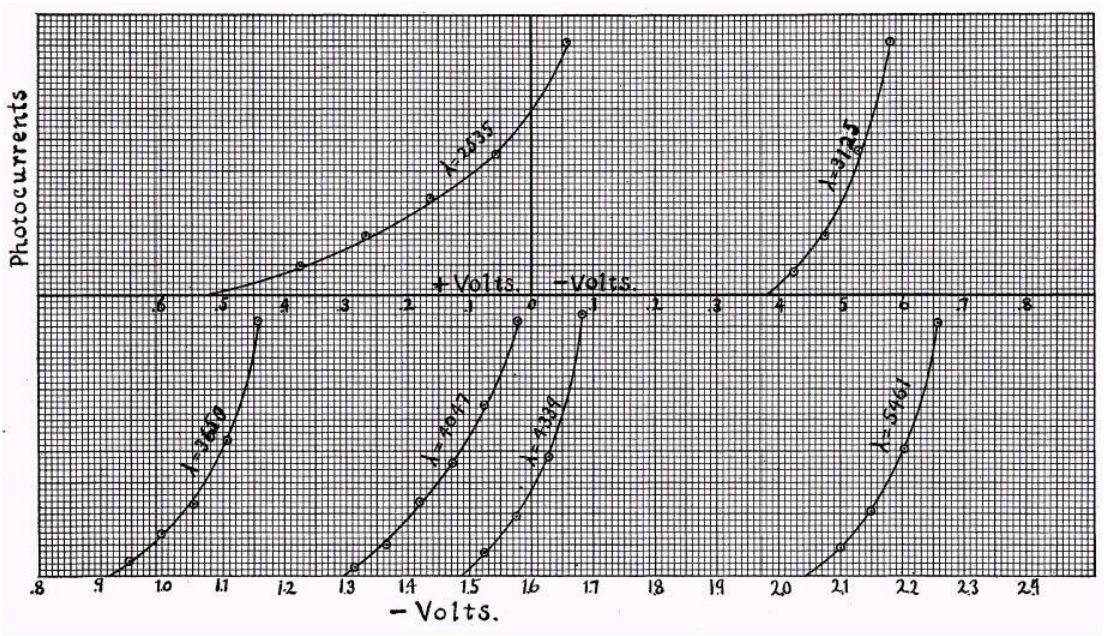

Figura 05: *Conjunto de curvas de fotocorrente em função do potencial, para o Sódio*. (MILLIKAN, 1916. P. 371).

Com a Figura 04, podemos visualizar a relação entre a frequência e o potencial de corte, e verificamos que todas as curvas, exceto aquela cujo comprimento é λ = 2,535, atinge o potencial no lado da voltagem negativa. Já o resultado de se traçar as interceptações no eixo potencial em relação à frequência é dado pela Figura 05. Que nos mostra que existe exatidão na relação entre o π e ν:

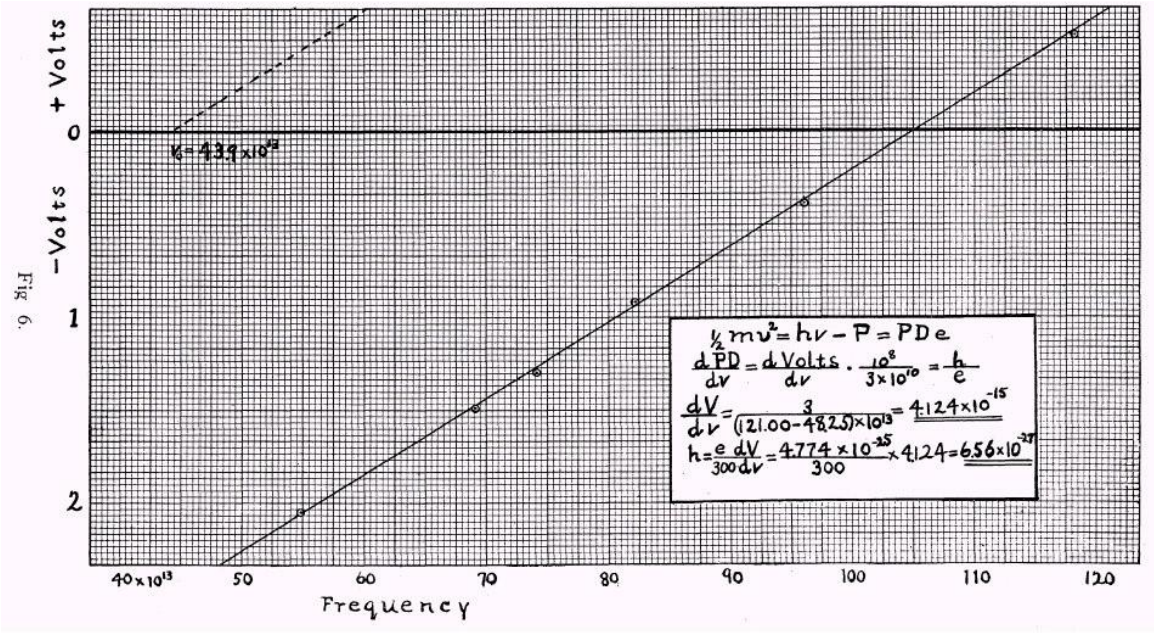

Figura 06: *Relação entre o potencial e a frequência (para o sódio)* (MILLIKAN, 1916. p. 373)

Tomando como base essa atividades experimentais desenvolvidas, Millikan (1916), verificou que os experimentos realizados revelam que a variação da corrente era diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente sobre a superfície do foto-catodo. Essa relação de dependência entre a corrente e a intensidade de radiação não poderia ser explicada com base em fundamentos clássicos; com isso, a teoria eletromagnética de Maxwell não poderia ser aplicada para essa situação. Outro fato que não poderia ser explicado classicamente era a relação entre o potencial e a frequência da radiação incidente. Quando mediu as energias dos elétrons ejetados, a partir de vários metais por diferentes frequências de luz, Millikan verificou que, enquanto cada metal tinha uma função de trabalho diferente, a constante de Planck tinha o mesmo valor.

Após o foto-potencial ter sido medido por uma série de frequências (ν) diferentes, é possível traçar o gráfico π x ν. Como havia sido preconizada em Einstein (1905), a dependência deveria ser retilínea, ou seja, a inclinação da reta deveria ser (h/e). Esta explicação do efeito fotoelétrico não só confirmou a equação de Einstein e a teoria de

Planck, mostrou diretamente que feixes de energia já existem no campo eletromagnético, como apontam Du Bridge e Epstein (1959).

Basicamente, o trabalho de Millikan consistiu em fazer incidir radiação de diferentes frequências sobre alguns tipos de metais, como sódio e lítio, por exemplo, e mostrou que os resultados que obteve eram independentes da natureza do metal utilizado, admitindo a proporcionalidade entre a energia cinética dos elétrons ejetados e a frequência da luz incidente, como havia sido preconizado por Einstein em sua equação para o efeito fotoelétrico, segundo Wheaton (1983, p.239). A razão para o sucesso de Millikan foi agir no ponto em que seus antecessores falharam. Esses eram leigos na escolha das condições e na forma de minimizar todas as fontes de erro. Um dos cuidados adotados por Millikan e que deve ser destacado foi a utilização de superfícies metálicas limpas, pois se esse detalhe fosse ignorado, as descargas de faíscas poderiam alterar o resultado medido pela indução de potenciais nas oscilações elétricas do aparelho.

Millikan adotou alguns cuidados na realização dos experimentos, como pode ser percebido nos trabalhos de Du Bridge e Epstein (1959) e Millikan (1916). Ele estendeu os intervalos de frequência, pois acreditava que Einstein havia utilizado um intervalo de frequência muito estreito. Assim, para corrigir esse problema, utiliza metais alcalinos que são fotossensíveis e podem estender um pouco essa faixa. Os materiais utilizados e adotados como referência também eram fotossensíveis, o que dificultava na identificação dessa frequência em decorrência da luz que era refletida. Por conseguinte, Millikan usou como referência o corpo de uma gaiola de Faraday feita em cobre bem oxidado, pois a fotossensibilidade deste material se estende a um comprimento de onda menor, minimizando erros nas medidas.

No que se refere à intensidade da frequência, Millikan percebeu que havia problemas para estudar situações em que se utilizava luz de menor frequência. Para que isso não acontecesse, ele utilizava uma lâmpada de mercúrio de quartzo monocromática de alta pressão, e toda dispersão de luz (ou luz difusa) foi bastante reduzida com a ajuda de filtros de luz adequados. Os resultados destas investigações ascenderam para uma confirmação completa da equação de Einstein, ficando comprovada a dependência retilínea de π e ν, bem como a inclinação da reta ser igual ao h/e. Estes resultados estabeleciam o papel que cada quantum de ação h, de Planck, desempenha no efeito fotoelétrico. Representando também a determinação numérica mais exata para essa constante fundamental.

2.4.2 Algumas considerações

Costuma-se pensar que Millikan teria sido o único físico experimental que se dedicou ao estudo experimental do efeito fotoelétrico, só que isso não é verdade. Como apresentamos nesse tópico, muitos outros físicos realizaram atividades experimentais para conseguir mostrar experimentalmente que Einstein estava equivocado. Contudo, não obtiveram êxito, ou seja, não conseguiram desenvolver atividades que lhes permitisse descrever detalhes sobre a teoria e equação propostas por Einstein. Além disso, existem as teorias alternativas, que surgem como uma tentativa mais "radical" para se explicar o fenômeno e, nesse caso, destacamos o trabalho do físico Johannes Stark.

De acordo com Wheaton (1983), Stark escreveu um trabalho sobre o efeito fotoelétrico muito semelhante ao do Einstein (foi um dos poucos físicos da época que concordou com o trabalho de Einstein), defendendo a descontinuidade de radiação para explicação do fenômeno. Além disso, destacou-se por seus trabalhos com raios canais; calculou o menor comprimento de onda possível para os raios-x em função do potencial que acelera os raios catódicos e também calculou a velocidade máxima de emissão dos elétrons pelos raios-x, como argumenta Wheaton (1983, p. 116-126). De modo geral, a ideia de destacar essas teorias é lembrar que a Ciência não se desenvolve por meio de um único pesquisador, mas que existe uma infinidade de contribuições para que se possa chegar à elucidação do fenômeno.

Por fim, discutimos sobre a confirmação da teoria de Einstein realizada por Millikan. Na verdade, esse episódio nunca aconteceu. Para que possamos entender melhor esse aspecto, vejamos as argumentações de Millikan sobre o fenômeno. Em Millikan (1916), no final de seu artigo, admite-se que talvez seja muito cedo para se afirmar com absoluta confiança a validade geral e exata da equação de Einstein. No entanto, deve-se reconhecer que as experiências atuais se constituíam na melhor justificativa para tal afirmação e essa equação, tendo validade geral, deveria ser considerada como um das equações mais fundamentais.

Para Millikan (1924), confirma-se de forma definitiva a comprovação das equações de Einstein:

> Depois de dez anos de testes e mudanças, aprendendo e às vezes errando, todos os esforços que estão sendo dirigidos desde o início para uma medição experimental exata das energias de emissão de fotoelétrons, às vezes em função

> da temperatura, às vezes do comprimento de onda, outras vezes do material (relação força eletromotriz de contato), **este trabalho resultou, ao contrário da minha própria expectativa, na primeira prova experimental em 1914, da validade exata, dentro de estreitos limites do erro experimental, da equação de Einstein,** e a primeira determinação fotoelétrica da constante h de Planck (...). Mas, no momento atual, não seria exagero dizer, que a prova completamente esmagadora, fornecida pelas experiências realizada por observadores diferentes, que trabalham por diferentes métodos em muitos laboratórios diferentes, que **a equação de Einstein é uma validade exata** (sempre dentro dos presentes pequenos limites de erro experimental) e de muita aplicabilidade geral, é talvez o resultado mais visível da Física Experimental da última década (MILLIKAN, 1924, p.61-62. Destaques nossos)[36].

Assim, concluimos com essa breve explanação acerca das contribuições de Millikan, que sua tentativa de estabelecer a forma matemática da relação entre elétron ejetado, a energia incidente e a frequência teve grande importância, permitindo uma comprovação experimental da equação de Einstein. Não obstante, cabe ressaltar que o trabalho de Millikan atesta a validade da equação de Einstein, mas não a sua teoria. Em síntese, as ideias de Einstein ainda pareciam um pouco obscuras, embora não restassem dúvidas sobre a validade da equação.

[36] (Tradução nossa)

3. A HISTÓRIA DA CIÊNCIA NO ENSINO DE CIÊNCIAS

O modelo contemporâneo de ensino deixa a desejar no que se refere à elaboração de um currículo que vise desenvolver o ser humano como um indivíduo crítico e atuante na sociedade em que está inserido. O ensino atual ainda possui suas bases em um modelo tecnicista, desvinculado de realidades situadas. Nessa modalidade, aspectos sociais, históricos e filosóficos são negligenciados, terminando por adotar como base para seu desenvolvimento a exclusiva *matematização* de conteúdos, porque são apresentados de forma linear e fragmentada, exigindo que o aluno decore e reproduza fórmulas, sem a necessidade da compreensão de seus resultados e sua contextualização (TEIXEIRA, 2007).

Nosso intuito é buscar soluções para que tenhamos uma prática de ensino mais eficiente, ou seja, que possamos desenvolver uma prática lúdica que desenvolva os conhecimentos de forma mais contextualizada. Para isso, consideramos a utilização da História da Ciência (HC) como uma forma de melhorar esse ensino. Uma das grandes contribuições da HC é esclarecer alguns aspectos obscuros, assim como a ruptura de determinados padrões que aparecem constantemente nos livros didáticos, de modo que se possa abolir o empiricismo radical, onde se acredita que a prática experimental consegue provar qualquer teoria científica e o indutivismo, enriquecendo os conteúdos trabalhados (PLAGLIARINI, 2007, p. 23).

3.1 Por que utilizar a História da Ciência (HC)?

Ao longo de nossos estudos sobre a utilização da HC como uma forma eficiente de melhorar o ensino e aprendizagem de conteúdos da Física na educação básica, notamos que muitas literaturas (MATTHEWS, 1994 e PAGLIARINI, 2007) já utilizam e discutem essa temática. A defesa da utilização de aspectos históricos parte daqueles que defendem que o ensino ocorra de forma contextualizada. Um de seus grandes defensores é Michael R. Matthews, que escreveu alguns trabalhos importantes sobre essa temática e vem nos alertando sobre a relevância desse estudo. Ao enfatizar também a questão da interdisciplinaridade, discute a importância da associação de aspectos sociais, históricos, éticos, filosóficos e tecnológicos com o conteúdo estudado e com o dia a dia dos indivíduos, para que percebam os fatos não como independentes e isolados, mas como diretamente relacionados e influentes recíprocos/múltiplos (MATTHEWS, 1995).

Em seus textos, em particular Matthews (1994), ele nos chama a atenção para a problemática da fragmentação presente nos materiais didáticos contemporâneos. Um dos maiores problemas decorrentes da fragmentação é a distorção histórica do fenômeno, bem como a distorção da própria natureza da ciência, por isso é necessário estar sempre atento para evitá-la.

Para esse estudioso, a HC deixou de ser uma discussão de conteúdo e vem sendo utilizada para o desenvolvimento científico prático e para entender o mundo de uma maneira geral, pois a ciência nos explica desde a produção de comida, medicina, guerra, indústria, até a origem do universo. Enfim, uma infinidade de fatores pode ser discutida com o aporte teórico da ciência. Isso nos faz crer que é preciso capacitar o indivíduo para essa compreensão, pois acreditamos que esses fatos sofrem influência direta do processo histórico. Além disso, ele ainda aponta algumas vantagens da utilização dessa prática, nos argumentando que:

> A história, a filosofia e a sociologia das ciências (...) podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral da matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do "mar de falta de significação" que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como o espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas (MATTHEWS, 1995, p.165)

Seguindo ainda esse raciocínio, Matthews (1994, p.7) elenca alguns pontos relevantes que defendem a utilização da HC no ensino de ciências, por proporcionar: a) *humanização das ciências,* pelas preocupações pessoais do indivíduo e temas como ética, cultura e política, significando o rompimento com ideias errôneas comumente encontradas nas literaturas, como, por exemplo, a ideia de gênio e desenvolvimento linear da ciência; b) *aulas mais provocativas*, com discussões em sala de aula que favoreçam o desenvolvimento de habilidades de raciocínio e criticidade; c) *melhor compreensão do conteúdo,* já que visa romper com alguns métodos do ensino tradicional que se mostraram falhos, ou seja, suprimir essa demasiada exposição de fórmulas e equações, por um método que permita compreender o que está sendo exposto e não apenas reproduzir; d) *formação do professor comprometida com seu papel na sociedade em que está inserido,*

compreendendo melhor as dificuldades encontradas pelos alunos, alertando-os para as dificuldades históricas do desenvolvimento científico e das mudanças conceituais; e) *melhor compreensão dos debates atuais sobre a educação*, uma vez que se possui um suporte histórico que possibilita compreender a evolução do processo educacional, bem como as influências sociais e políticas que culminaram nessa situação.

Corroborando com essa ideia em defesa da inserção da História da Ciência no ensino, Martins (2005) adiciona que a HC deve ser utilizada como um dispositivo didático útil para tornar o Ensino mais interessante, facilitando para que haja aprendizagem por parte dos alunos. Além disso, sua utilização pode contribuir para mostrar, através de episódios históricos, o processo gradativo e lento da construção do conhecimento, permitindo uma visão concreta da natureza real da ciência, seus métodos, suas limitações. Isso pode fornecer uma formação mais crítica e argumentativa, desmistificando a ideia de ciência infalível. Com essa abordagem, o aluno pode perceber que a aceitação ou rejeição de uma proposta não depende do seu valor intrínseco, mas sim de outros valores, como sociais, filosóficos, políticos e religiosos, pertinentes à época em que se desenvolve. Obviamente o uso da HC não implica necessariamente nesses resultados, contudo, podem contribuir fortemente para que esses resultados sejam alcançados.

3.2 Sobre o uso da História da Ciência (HC) para o ensino e suas dificuldades

O uso da História da Ciência (HC) em sala de aula para melhorar o ensino de Física e/ou Ciência de uma maneira geral vem sendo constantemente destacado nos textos atuais. Contudo, essa ferramenta de ensino apresenta algumas dificuldades no que se refere a esse processo. Embora favorável à utilização dessa temática, Matthews (1994) evidencia uma série de dificuldades, destacando que uma delas envolve a formação do professor. Segundo apresenta, esse profissional precisa desenvolver três competências para entender e utilizar a história da ciência como uma modalidade de auxílio no ensino da Física: 1) saber a ciência que ensina (ou seja, o professor deve ter domínio do conteúdo que deseja transmitir). 2) conhecimento em História e Filosofia das Ciências (HFC), o que permitirá um entendimento mais aprofundado acerca da temática e 3) domínio de alguma teoria educacional, o que permitirá a aplicabilidade e fornecerá um método de avaliação para essa atividade.

É preciso que o professor tenha competência e habilidade suficientes para discutir aspectos históricos e sociais que envolvem o fenômeno que será estudado. Entendemos que o contexto social desempenha um papel importante, uma vez que questões, como, por exemplo, as influências religiosas, políticas, e econômicas de uma época, levam a entender como aquela sociedade foi moldada por esses fatores, além de contribuir para suprimir grandes deficiências do ensino atual, que não trabalha com essas questões, como nos apontam Matthews (1994). Desse modo, ressaltamos, com a seguinte colocação, a importância da HC na formação do professor:

> Sob o ponto de vista da própria competência científica, a História da Ciência também pode dar sua contribuição. A própria compreensão dos resultados científicos mais complexos é virtualmente impossível, sem o conhecimento histórico. Pensem, por exemplo, nas concepções sobre estrutura atômica, núcleo, elétrons, orbitais, etc. Sem se saber como de fato se estabeleceu o tamanho dos átomos, dos núcleos, o número de elétrons de cada elemento, etc., esses conhecimentos não podem ser compreendidos – podem apenas ser memorizados e repetidos. Sem a história, não se pode também conhecer e ensinar a base, a fundamentação da ciência, que é constituída por certos fatos e argumentos efetivamente observados, propostos e discutidos em certas épocas. Ensinar um resultado sem fundamentação é simplesmente doutrinar e não ensinar ciência. (MARTINS, 1990, p. 4).

Com essas considerações, destacamos que para um estudo eficiente da HC, não é necessário apenas conhecimento específico do tema, mas, requer outras técnicas que só serão estabelecidas ao longo de alguns anos de prática, como afirma Martins (2005). Este autor aponta que não é preciso o professor ser um especialista de área, mas se não tiver o mínimo domínio desse conhecimento, provavelmente irá cometer alguns erros e inadequações (o que será mais danoso para o aluno), pois, na falta de maturidade suficiente para reconhecer as fontes, poderá utilizar, ingenuamente, materiais que possuam um conteúdo de baixa qualidade.

Na atualidade, é comum encontrarmos livros didáticos ou textos de divulgação científica que estejam permeados por diversas concepções distorcidas e simplificadas, como já havia sido preconizado por Kuhn (1998), marcando o processo histórico como sendo resultado dos trabalhos de grandes gênios que criaram uma ciência que se desenvolve linearmente por meio de uma sucessão de descobertas. Por conseguinte, essas concepções acabam sendo recebidas e propagadas por professores acerca da História da Ciência, segundo Martins (2005; 2006). Contudo, cabe ao professor ter consciência das consequências do ensino através do uso da HC, já que a propagação de mitos ou estórias

acaba por passar para os alunos uma visão completamente errônea sobre o desenvolvimento científico e sobre a própria natureza da ciência.

3.3 Algumas inadequações frequentes na utilização da HC

Mesmo que a importância da utilização da HC para o ensino das ciências seja demasiadamente discutida (MARTINS, 1990; 2005; MATTHEWS, 2004; 2005) é inegável que essa é uma temática que esbarra em muitas dificuldades (discutidas ao longo desse tópico). Inicialmente, vale salientar, a história da ciência é consequência do trabalho humano e consiste na reconstrução de episódios que ocorreram no passado. Em alguns casos, é analisado um intervalo de tempo muito grande, como, por exemplo, a análise da teoria atômica no período dos gregos, ou ainda, dos trabalhos de observação de Ptolomeu. Assim, não é incomum encontrarmos inconsistências e inadequações históricas, como foi preconizado por Martins (2005).

No que se refere a essas inadequações, podemos colocar que algumas delas se tornam bastante perigosas e conseguem comprometer o trabalho científico. Dentro desse contexto, discutiremos sobre algumas dessas inadequações comumente encontradas nas literaturas, a fim de que possamos suprimi-las ou evitá-las. A escolha dessas inadequações, especificamente, se deve ao fato de que servirão como critério para que possamos realizar a análise do livro didático, que é o objetivo principal do nosso trabalho.

Em primeiro lugar, há a inadequação de tratar a *história da ciência como puramente descritiva*. De acordo com Martins, (2005), é comum que os materiais utilizados para a divulgação e estudo da HC, apresentem os episódios históricos expressos por uma data, apenas. Em alguns casos, a data se associa a uma descoberta, para a qual geralmente aparece o nome de um cientista que teria analisado o fenômeno. Todavia, o estabelecimento de uma data não contribui para o entendimento do fenômeno, muito menos para descrição de sua evolução histórica.

O contexto das descobertas, tais como detalhes de seu tempo, cultura, colaborações, influências, erros, plágios, dentre outros, acaba por se tornar aspecto secundário e, muitas vezes, é completamente omitido. Como consequência dessa idealização, esses tipos de narrativas históricas reforçam a ideia da existência de um método científico algorítmico, que assegura aos grandiosos cientistas o encontro da verdade científica, como preconizado por Allchin (2003).

A adoção dessa prática é problemática por sugerir a existência de grandes gênios, que em uma data específica descobrem determinado fenômeno rapidamente, como num passe de mágica. Em contrapartida, a ciência é um processo lento, e necessita, em alguns casos, de muitos anos de estudo (que conta com a contribuição de vários pesquisadores) para que enfim possa se chegar à elucidação do fenômeno, que também poderá ser considerado inadequado em períodos posteriores. Portanto, esse modelo de ciência linear não possui validade e deturpa a natureza da ciência.

Em segundo lugar, considera-se o *whigguismo ou anacronismo*, que consiste no ato de se analisar um episódio que aconteceu no passado, partindo de um ponto de vista que temos na atualidade. Um dos grandes críticos dessa abordagem foi Herbert Butterfield, que denunciou essa concepção por ser completamente equivocada e falha (ALVARGONZÁLEZ, 2013, p. 85). Se, por exemplo, desejamos analisar o desenvolvimento dos estudos de um fenômeno, que se ampliou em um período de cinquenta anos, não podemos analisar a primeira década e a última sob o mesmo ponto de vista, pois os períodos são diferentes, logo, os pressupostos e teorias também são.

Neste caso, comumente, o historiador da ciência busca no passado ideias que possam justificar suas atuais concepções. Desse modo, não se pode dar muita credibilidade a um estudo que se baseia unicamente no que o pesquisador aceita, ignorando completamente o contexto da época. O ideal seria que o historiador da ciência procurasse se familiarizar com a atmosfera da época que está estudando, sem perder de vista o que veio depois (História da Ciência diacrônica), como sinalizado por Martins (2005) e Mayr (1990).

De acordo com Allchin (2004), a história funciona como um dispositivo político para legitimar autoridade. Se eliminarmos um elemento qualquer dessa história, faremos com que o leitor acredite que o resultado foi inevitável. A HC também apresenta anacronismo quando lança uma teoria particular tida como correta desde o início, que considera como errônea qualquer teoria alternativa. Assim, a incerteza é suprimida, fazendo com que o passado obedeça a um presente idealizado.

É muito comum que teorias opostas ou semelhantes (que se destinam a explicar uma mesma teoria) sejam constantemente comparadas entre si. Entretanto, essa comparação é um equívoco, pela ausência de critérios que nos permitam fazê-las, pois são teorias criadas em situações únicas, não podendo ser aplicadas em situações diferentes daquelas para as quais foram estabelecidas. Dessa maneira, o ato de observar

anacronicamente esses episódios nos leva a descartar teorias que atualmente não são reconhecidas, pois, temos teorias "melhores" o que acaba distorcendo o processo de construção das ciências, como defendido por Allchin (2004) e Alvargonzález (2013).

Em terceiro lugar, durante o desenvolvimento da nossa pesquisa, várias referências bibliográficas lidas (WHITAKER, 1979; MATTHEWS, 1994; MARTINS, 2006; entre outros) apontavam, de forma significativa, para uma percepção, distorcida e superficial da História da Ciência (HC) encontrada na maioria dos livros didáticos de Física, chamando-a de *pseudo-história*, por reforçar alguns conhecidos mitos científicos e transmitir falsas concepções históricas a estudantes e professores.

A pseudo-história é algo bastante danoso para a HC, pois induz professores e alunos a erros e falsas concepções sobre a natureza da ciência, passando a descrevê-la de forma simplificada e estereotipada. Esses estereótipos geralmente são perpetuados não só no que diz respeito ao ensino, também de uma forma cultural, como salienta Allchin (2004). Normalmente, as pseudo-histórias são derivadas das discussões sobre a ciência e sobre como ela funciona, partindo de concepções do senso comum. Como resultado, temos a ideia de métodos científicos (geralmente infalíveis), a serem seguidos fielmente para que se possa chegar a um resultado esperado.

De acordo com Allchin (op. cit.), o perigo da pseudociência é, dentre outros, criar uma HC como capaz de resolver todos os problemas educacionais, marcado constantemente por um Ciência sempre vitoriosa e imune a erros.. Se por um lado, defendemos a importância da HC, por outro lado, alertamos para o perigo de se utilizar estórias para o ensino da física. Nesse caso, o que ocorre é uma idealização da ciência, que aparece nesses textos marcados pela simplificação dos fatos, da idealização dos cientistas, que passam a ser vistos quase como divindades. Quando isso ocorre, temos o mito científico.

Em quarto lugar, então, o *mito científico* tem o papel de justificar a validade e veracidade da ciência, criando um ambiente perfeito para seu desenvolvimento: os cientistas gênios e os experimentos infalíveis. Isso ocorre pelo fato de ocultar o percurso histórico realizado por diversos pesquisadores até chegar à elucidação de um fenômeno. Se os erros são ocultados, obviamente, a ideia que permanece é a de que a ciência é um campo para os acertos e as verdades incontestáveis.

Para Allchin (op. cit.), mito científico é algo extremamente danoso para o ensino, pois, embora baseado em fatos históricos reais, distorce a base científica e cria visões

estereotipadas, na maioria das vezes infundadas. Essas são pseudo-histórias que promovem falsas concepções sobre a ciência - neste caso, sobre como a ciência funciona. Geralmente é adotado um procedimento empírico-indutivista, que traz a ideia de que a simples observação culmina na obtenção de uma nova lei ou teoria científica, de maneira puramente mecânica. Por esses motivos, a "lição" de que a ciência não tem nenhum método universal não é validado nesse processo; porque os fatores humanos da ciência, como a imaginação, criatividade e até mesmo os erros cometidos ao longo de seu desenvolvimento, são esquecidos, como expõe Whitaker (1979).

Algumas situações encontradas nos mitos científicos são discutidas por Allchin (2003), através da análise que faz sobre os trabalhos de Mendel, Kettlewell, Fleming, Semmelweis e William Harvey. Esse autor nos aponta diversos fatores que permitem identificar se uma determinada narrativa é ou não uma pseudo-história, quais sejam:

- **Monumentalidade**;
- **Idealização**;
- **Drama**;
- **Justificação**.

Allchin (2003) trata a **monumentalidade** como a grandiosidade do cientista, de personalidade virtuosa, que não apresenta falta de caráter e nem está propenso ao erro ou equívoco. Nessa perspectiva, a descoberta, historicamente marcada por um processo lento e gradual, aparece como um processo linear, associado a um único pesquisador. Desse modo, os cientistas aparecem como lendas, heróis e deuses, que tem lampejos de ideias jamais pensadas pelos demais indivíduos. Esses personagens sobre-humanos, míticos, funcionam como modelos que inspiram os alunos, mas, paradoxalmente, esta mesma imagem de ciência parece subverter o objetivo atual de retratá-la como um esforço humano, pois passa a concepção de que seus feitos estão muito distantes da capacidade intelectual de seres humanos ditos normais.

Semelhante a essa grandiosidade se encontra a **idealização**, como a crença de que o trabalho científico é avançado em demasia e de difícil compreensão. Mesmo partindo do pressuposto de que a ciência consegue responder a questionamentos de diversas naturezas, esse pensamento idealista faz com que as pessoas, por vezes, esperem muito dela. A idealização se torna, pois, evidente pelos equívocos que consegue gerar.

Nas narrativas contadas, o **drama** é a batalha do cientista (externa ou interna) de triunfar verdade e sabedoria, apesar de todo sofrimento e prostração. Destaca-se a emoção de uma nova descoberta, a surpresa do acaso, o desespero nos estudos, tudo de maneira demasiadamente exagerada e lírica, com ideias geralmente estereotipadas em imagens e charges. Outro dispositivo retórico muito forte, simbolizado no drama, é ampliar o bem, contrastando-o com o mal, a exemplo de um herói contra um adversário (Allchin, 2003, p. 346).

O elemento final que configura uma estória como mito científico é a **justificação**. Os contos históricos que assumem esse aspecto mitológico nos mostra como uma série de eventos leva a um determinado resultado, que Allchin (2003) denomina de *achado científico*. O mito científico é uma história fictícia, geralmente com um final épico que tem o intuito de nos mostrar uma "lição" (implícita ou até mesmo moral), por meio desse *achado*. Em seu texto, o autor aclara que a maioria desses mitos serve para justificar a autoridade da conclusão científica.

Diante de tantas problemáticas, não é incomum perceber que o desejo de descrever uma imagem da ciência humanizada ultrapassa os fatos históricos. De acordo com Bastos Filho (2012), para fins de transposição didática, a simplificação e o anacronismo podem ser inevitáveis para educação, esses chamados *atalhos cognitivos,* contudo, devem apresentar fidelidade ao conteúdo original e mesmo que tenha sido modificado permaneça pertinente. Nesse sentido, o autor ainda destaca que "atalhos cognitivos são absolutamente necessários, mas o professor não poderá abdicar de sua própria autonomia para envidar os seus esforços para separar o joio do trigo." (BASTOS FILHO, 2012, p. 80). Como a HC aparece com maior frequência enquanto um modo de informação, e não de ensino[37], muitos detalhes relevantes tendem a ser perdidos ou vistos como secundários. Os mitos destacam contribuições "positivas", mas erros ou "falhas" são obscurecidos. Como resposta, as histórias tendem a conservar apenas os elementos necessários para justificar o resultado narrativamente. Na verdade, isso pode parecer apropriado se a pretensão for uma história como uma lição na natureza científica. (Allchin, 2003, p. 344).

Durante minha formação acadêmica, mais especificamente no curso de História da Física, foi possível observar uma série de pseudo-história da ciência que permeiam os

[37] Isso pode ser percebido nos livros didáticos que trazem uma tirinha ou uma nota de rodapé para fazer o relato histórico de um fenômeno, mas, mesmo assim, não discutem o episódio.

materiais de estudo (livros textos, apostilas, textos de divulgação científica e principalmente a internet). Esses materiais eram analisados durante as aulas por meio da comparação com outros originais ou secundários de boa qualidade, ou seja, livros clássicos e artigos publicados em períodos que apresentam conceito elevado.. Os materiais analisados eram direcionados para o ensino médio e estavam constantemente permeados pela utilização de mitos para apresentar o conteúdo referente à HC. Por exemplo, podemos destacar o caso da maçã de Newton, a banheira de Arquimedes, a descoberta da radioatividade por Becquerel, entre outros, promovendo uma visão simplificada e deturpada para os alunos leitores em potencial. Nessas atividades, é constante a tentativa de simplificar os conteúdos históricos, recorrendo bastante aos mitos e ao anacronismo, usados como ferramenta com propósitos pedagógicos. Todavia, ao invés de tornar mais acessível o entendimento científico, acaba-se passando uma visão distorcida da natureza da ciência.

Partindo dessa premissa, nossa preocupação se volta para os livros didáticos usados na maioria das Universidades e nos cursos de Licenciatura em Física, promovendo a formação de futuros professores, pois, como já discutido em Martins (2006) e Whitaker (1979), é comum que esses materiais estejam permeados por inadequações. Isso acontece porque essas narrativas têm uma estrutura que utiliza diversos artifícios retóricos, estabelecendo o mito que explica e justifica a autoridade da ciência. Como descrito por Allchin (2003), esses elementos conspiram juntos para desmoronar a natureza da ciência em uma pseudo-história, que se torna muito familiar, de ‘Como a Ciência encontra a verdade’.

3.4. Por que analisar os Livros Didáticos (LD)?

O livro didático desempenha um papel de destaque para o ensino e ainda é uma das ferramentas mais utilizadas como fonte de conhecimento, tentando dar um suporte estável para a relação de ensino/aprendizagem entre professor e aluno, dentro e fora da sala de aula (SANTOS, 2006, p. 66). Nesta literatura, aponta-se que mesmo com todo desenvolvimento tecnológico e a utilização da informática como forma de transmissão e obtenção de conhecimento, o LD se mantêm como um dos materiais mais influentes, fazendo necessário que sua qualidade seja constantemente avaliada, como é destacado nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, PCNEM (1999).

Apesar de muitos livros didáticos se apoiarem em referenciais teóricos bem fundamentados, como constatamos em suas referências bibliográficas e orientações metodológicas, não é possível observar a aplicação dessas ideias de forma efetiva em seus textos e atividades (SANTOS, 2006). Notadamente, na prática, o que se percebe é que os LDs não tratam da História da Ciência de modo que leve o aluno e o professor a uma melhor concepção de ciência e de seus processos (ALLCHIN, 2004).

Caracteristicamente, os livros didáticos de ciência contêm apenas um pouco de história, seja em um capítulo introdutório ou, mais frequentemente, em referências esparsas[38]. Nota-se atualmente uma bibliografia destinada aos grandes heróis, que contam histórias fantasiosas (KUHN, 1998). Apesar de defendermos sua utilização, é preciso mostrar que existe ao longo da literatura uma lista de grandes pensadores que se mostram contrários a esse posicionamento, a exemplo do pesquisador da *estrutura das Revoluções Científicas*. Kuhn (op. cit.) pondera que os manuais científicos fazem referências apenas a partes de trabalho, de antigos cientistas, que estão de acordo com o que se defende e com a solução para problemas apresentados pelo paradigma dos manuais. Ademais, o físico revela que esses manuais transmitem a ideia de que os cientistas já nascem comprometidos com o paradigma vigente, dando a impressão de que a ciência só chegou aonde chegou através de uma série de intervenções e descobertas individuais. Esse é um dos fatos que devemos ficar atentos em nossas discussões.

Obviamente, existe uma série de questões envolvendo o LD e a HC que poderiam ser destacadas aqui. Apesar da crescente quantidade de trabalhos (TEIXEIRA. et al, 2012) que enfatizam abordagens históricas de boa qualidade acerca de conteúdos de Física, há a necessidade de mais produção acadêmica na área, tanto porque esta precisa ser mais investigada, quanto pela sua necessidade de repercussão no ensino, já que professores ainda se encontram a mercê das mencionadas estórias fantasiosas e simplificadas. Assim, considerando a possibilidade do uso da HC no ensino e a importância de se ensinar um conteúdo relacionado à Física, ousamos verificar a apresentação da história contada em alguns livros didáticos usados na maioria das Universidades brasileiras, tomando como foco um assunto relevante e fortemente discutido em sala de aula dos cursos de formação de professores de física, bem como nas salas de aulas do Ensino Médio. Trata-se do

[38] O problema se configura na qualidade do material apresentado. Entretanto, seria inconveniente defender que se possa discutir um episódio histórico em poucas linhas e conseguir ser fiel ao processo de elucidação do fenômeno.

episódio histórico referente ao efeito fotoelétrico, protagonizando seus principais personagens, suas dificuldades, o contexto social da época, entre outros.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo, apresentamos a metodologia utilizada em nossa pesquisa, evidenciando as estratégias para responder à questão investigativa, sobre se há uma transposição histórica adequada, acerca do efeito fotoelétrico, em livros didáticos de Física do Ensino Superior. Notadamente, em nossa revisão de literatura, poucos trabalhos (JAMES, 1973; DESHMUKH; VENKATARAMAN, 2006; KLASSEN, 2009b; NIAZ et al, 2010) evidenciam esse tema, aliás, a maioria deles reflete mais sobre aplicações em sala de aula, experimentos que visam demonstrar o efeito fotoelétrico (TAVOLARO; CAVALCANTE, 2001; CAVALCANTE et al, 2002). Nossos objetivos perpassam essas reflexões, concentrando-se na interpretação histórica desse fenômeno em livros didáticos usados no curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB e, de forma específica, no relato historiográfico do Efeito Fotoelétrico.

4.1 Procedimentos metodológicos

De uma maneira geral, desenvolvemos nossa pesquisa sob o ponto de vista qualitativo, uma vez que nosso interesse de investigação está voltado para aspectos mais subjetivos, que não podem ser expressos por meio de quantidades ou expressões matemáticas. Desse modo, visando alcançar nossos objetivos, buscamos subsídios que nos levam a acreditar que este tipo de abordagem:

> [...] facilita descrever a complexidade de problemas e hipóteses, bem como analisar a interação entre variáveis, compreender e classificar determinados processos sociais, oferecer contribuições no processo das mudanças, criação ou formação de opiniões de determinados grupos e interpretação das particularidades dos comportamentos ou atitudes dos indivíduos. (RICHARDSON et alii, 2008, p. 80).

A pesquisa qualitativa informa a respeito de um nível de realidade que não pode ou não deveria ser quantificado. Esse tipo de pesquisa, como ressalta Minayo (2010), trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores, das atitudes, enfim, com todos esses fenômenos humanos que fazem parte de um contexto social, de uma realidade vivida e partilhada com outros semelhantes. Assim, entendemos

que esse nível de realidade não é mensurável, necessitando ser descrita e analisada pelo pesquisador.

Dentro de uma abordagem qualitativa, a análise documental pode se constituir em uma técnica valiosa, seja complementando as informações obtidas por outras técnicas, seja elucidando novos aspectos de um tema ou problema. Em definição, "a característica da pesquisa documental é que a fonte de coleta de dados está restrito a documentos, escrito ou não, constituindo o que se denomina de fontes primárias e/ou secundárias" (MARCONI; LAKATOS, 2010, p. 48). As fontes documentais abarcam uma gama significativa de informações, podem estar materializadas em arquivos históricos, em documentos oficiais, nos diários, biografias, jornais, revistas, materiais didáticos, enfim, nos mais diversos registros estatísticos que possibilitem um levantamento favorável ao que se pretende pesquisar. Para Gil (1999), a coleta de dados a partir de registros documentais não incomoda os participantes e é a mais simples das técnicas, se comparada aos procedimentos diretos, como a observação e a entrevista.

Partindo desses pressupostos, a presente pesquisa documental se dividiu em duas etapas: A primeira etapa consistiu na busca e análise bibliográfica de fontes originais e secundárias de boa qualidade, que nos permitiram compreender o episódio histórico do efeito fotoelétrico, levando em consideração as discussões realizadas por quatro cientistas envolvidos diretamente na sua elucidação. A leitura dos artigos originais desses cientistas e de fontes secundárias confiáveis nos proporcionou um contato direto com suas ideias, permitindo-nos traçar uma explicação científica do fenômeno, fugindo de interpretações equivocadas ou distorcidas amplamente citadas nas literaturas (WHITAKER, 1979; MARTINS, 2001 e ALLCHIN, 2004). A consulta a algumas referências secundárias também foi importante por nos nortear em relação a alguns contextos científicos da época que fugiu à nossa compreensão.

A escolha desse episódio histórico, Efeito Fotoelétrico, perpassa a introdução da Física Moderna e Contemporânea em salas de aulas no Brasil e no mundo. Mais do que isso, trata-se de um assunto amplamente discutido e utilizado a partir das novas tecnologias, além de influenciar os alunos na escolha de sua carreira científica.

Dessa maneira, no capítulo da fundamentação teórica desta dissertação, analisamos alguns artigos e livros importantes (HERTZ, 1893; EINSTEIN, 1905; LENARD, 1902; LENARD, 1906; MILLIKAN, 1916; MILLIKAN, 1924; WHEATON, 1983) que nortearam nossa análise dos livros didáticos apontados na referência da

disciplina de Física Moderna e Contemporânea destinada aos professores em formação do curso de Licenciatura em Física da UEPB.

Em primeiro momento, destacamos o trabalho de Hertz (1893), de descrever ondas eletromagnéticas, compará-las com a luz e comprovar experimentalmente as equações de Maxwell. Para ampliar nossas discussões, apoiamo-nos em Videira e Coelho (2012), com prefácio de Hertz sobre mecânica, escrito por Helmholtz. A ideia da utilização desse livro foi no sentido de ter um melhor aprofundamento sobre o assunto e de podermos descrever um relato fiel da vida e obra de Hertz.

No que se refere ao trabalho desenvolvido por Philipp Lenard, destacamos o artigo *On cathode rays*, de 1906, em que traz uma discussão acerca da produção de raios catódicos. Para complementar essa leitura, Lenard (1902) descreve a primeira explicação para o que atualmente chamamos de efeito fotoelétrico. Para elucidar algumas ideias que aparecem no texto, bem como algumas dificuldades que encontramos no que diz respeito à língua original, situamo-nos em Wheaton (1983), procurando traçar um paralelo entre este e o original.

O trabalho de Einstein (1905) apresenta uma análise heurística sobre a produção e transformação da luz. Nesse artigo, ele explica fenômenos luminosos por meio da ideia de quantização de energia de forma descontínua, de modo que rompe com princípios defendidos pela Física Clássica, dando início ao que atualmente denominamos Física Quântica.

Por fim, adotamos dois importantes trabalhos de Robert A. Millikan que mostram como conseguiu comprovar experimentalmente o fenômeno. Millikan (1916) apresenta pressupostos teóricos que o levou a discordar da teoria quântica proposta por Einstein, além de todo trabalho experimental desenvolvido para elucidação do fenômeno. Já Millikan (1924), que ganhou o prêmio Nobel ao trabalhar com cargas elementares e o efeito fotoelétrico, mostra a confirmação experimental e o reconhecimento da validade da equação desenvolvida por Einstein em 1905.

Nossa fundamentação teórica, mais do que um viés cronológico muito comum na maioria dos livros aqui consultados, evidencia a importância de estudar física a partir de um processo histórico, para destacar aspectos conceituais, epistemológicos e metodológicos presentes e necessários ao processo ensino/ aprendizagem.

Em segundo momento, nossa pesquisa documental consistiu em selecionar e analisar os livros didáticos usados como referência no curso de Licenciatura em Física da

UEPB, em especial na disciplina de Física Moderna e Contemporânea. Para essa etapa, selecionamos quatro importantes livros acadêmicos, descritos a seguir.

O livro A[39] tem como foco a Física Moderna. De acordo com os autores, esta edição mantém e amplia um dos pontos fortes da obra: usar dados reais em figuras, fotografias de pesquisadores e instrumentos de pesquisa e citações de muitos cientistas que participaram do desenvolvimento da física moderna. O livro apresenta um mergulho no passado e é uma ponte para o futuro, mostrando quem foram as personagens e os pressupostos que ajudaram a construir a relatividade e a teoria quântica, como conhecemos na atualidade. Os fundamentos da Física Moderna (relatividade, quantização de energia, carga e luz); o átomo nuclear; as propriedades ondulatórias das partículas; a equação de Schroedinger; a física atômica e a física estatística; as propriedades e os espectros das moléculas; a física de partículas; e a astrofísica e cosmologia são os temas tratados neste livro.

O livro B[40] traz uma ideia inovadora intitulada pelos autores de *circo voador da Física*, apresentado como os tópicos relativamente curtos inseridos, de diversas formas, ao longo do texto e indicados por meio da figura de um pequeno biplano. Esse "circo voador" tem como objetivo tornar o assunto mais interessante e divertido e mostrar para o aluno como o mundo que nos cerca pode ser completamente examinado e compreendido usando princípios fundamentais da Física. No que se refere à estrutura do livro, destacamos a presença de um texto de abertura que visa motivar o aluno na leitura do restante do capítulo, há testes e exercícios, a fim de desenvolver o raciocínio para ideias-chave e táticas de solução de problemas, como também há problemas destinados ao aluno. Segundo os autores, o livro tem o intuito de fazer com que aprendizes usem o raciocínio para resolver problemas e perguntas lançadas sobre o assunto, além de fazer com que consigam compreender um gráfico e entender o que seus traços e curvas representam.

O Livro C[41] apresenta as ideias extraídas de pesquisas acadêmicas realizadas recentemente na área, enfatizando o ensino aprimorado por meio de recursos visuais pioneiros e um texto claro e direto, que ajudam o estudante a desenvolver a intuição física e a adquirir as habilidades necessárias para a solução de problemas. Além disso, o livro conta com diversos elementos que, segundo os autores, contribuem para a fixação dos

[39] TYPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999
[40] HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos da Física**. v.. 4. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
[41] YOUNG; FREEDMAN. **Física IV:** Ótica e física moderna**.** v. 4. 12. ed.. Rio de Janeiro: LTC, 2009. (Título original: *Sears and Zemansky*).

principais conceitos. Dentre os elementos, destacamos: a) tratamento dos objetivos de aprendizagem, no início de cada capítulo; b) apresentação de estratégia para a solução de problemas e de exemplos resolvidos, que fornecem aos estudantes, em quatro etapas, táticas específicas para a resolução de determinados tipos de problema; c) discussão de testes de aprendizados no final de cada seção e um resumo no final de cada capítulo.

O Livro D[42] é uma coleção que, segundo o autor, tem como objetivo fornecer uma discussão detalhada e cuidadosa de conceitos e princípios básicos da física, com ênfase na compreensão das ideias fundamentais. Procura-se desenvolver a intuição e a capacidade de raciocínio físico, tal como motivar o interesse do estudante. No quarto volume, ele debate sobre a física do século XX, discutindo os principais resultados da ótica geométrica, ondulatória e da eletromagnética; ademais, introduz a relatividade e as ideias básicas da física quântica, mostrando detalhadamente sua evolução histórica, formulação cuidadosa de seus princípios fundamentais e aplicações em sistemas simples. A partir do sétimo capítulo, apresenta o conteúdo referente à teoria quântica, revisitando o seu desenvolvimento histórico de formulação.

A análise desses livros acadêmicos são importantes, pois, acreditamos que esses exercem certo grau de contribuição na formação de futuros professores, portanto, é necessário mostrar como ele apresentam seus conteúdos. Nessa dimensão, comungamos com Abd-El-Khalick e Lederman (2000) quando argumentam em favor de que a maioria dos professores apresenta concepções inadequadas ou deformadas, quando lidam com o uso da HC em sala de aula. Sinalizam ainda que a HC, como uma ferramenta para o ensino de ciências, proporciona aos estudantes uma construção do conhecimento científico de forma não linear, como costumamos ver nos livros didáticos, quer sejam no Ensino Superior ou no Ensino Médio. Ao contrário, o bom uso da HC em sala de aula nos capacita a olhar criticamente e sem anacronismo para um episódio histórico, mostrando os pontos convergentes e divergentes da teoria ou do fenômeno que analisamos. Para tanto, procuramos levar em consideração dois critérios relevantes: a) a apresentação referente ao conteúdo histórico do fenômeno em questão, baseado em nossa fundamentação teórica; b) o desenvolvimento do conhecimento científico apresentado por esses materiais, levando-se em conta alguns aspectos discutidos em nossa revisão de literatura.

[42] NUSSENZVEIG, M**. Ótica, relatividade e física quântica**. Curso de Física básica. São Paulo: Blucher, 1998.

Apresentado o percurso metodológico, nossa pesquisa se sustenta pela hipótese de que uma abordagem histórica de episódios bem fundamentada é capaz de subsidiar professores em formação e, consequentemente, estudantes do Ensino Médio, oferecendo-lhes a oportunidade de acompanhar e entender a construção de teorias enquanto produto da contribuição de vários cientistas. Por conseguinte, foge-se de uma história linear, equivocada e de difícil interpretação. Dentro deste contexto, sentimos falta de parâmetros curriculares que nos norteasse a respeito da aplicabilidade e qualidade da HC em livros didáticos do Ensino Superior, como ocorre no Ensino Médio, a exemplo dos PNLD ou PNLEM.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo se propõe, inicialmente, a mostrar o perfil dos livros didáticos de Física, selecionados dentro do âmbito do curso de Licenciatura em Física da UEPB, em especial àqueles voltados a referendar a disciplina de Física Moderna e Contemporânea. Em seguida, dentro dos critérios pré-estabelecidos, esses livros são descritos e analisados a partir do foco principal apresentado, o efeito fotoelétrico. Para tanto, a fundamentação teórica e a revisão de literatura desenvolvida subsidiam uma discussão mais acurada, ao tempo em que conduzem a uma resposta satisfatória a respeito das questões de pesquisa apresentadas na introdução deste trabalho.

5.1 Livros analisados

A escolha dos livros didáticos para análise dos critérios aqui dotados foi pensada a partir das referências citadas no corpo do programa da disciplina Física Moderna e Contemporânea, do curso de Licenciatura em Física da UEPB. Dentre os livros citados, escolhemos os quatro mais indicados pelos professores e/ou os mais consultados pelos alunos da referida disciplina. Diante desse contexto, foi dada uma prioridade àqueles títulos que possuem maior quantidade de exemplares na biblioteca da instituição, pois geralmente esses estão disponíveis para empréstimo aos alunos. Além disso, foram priorizadas as publicações mais recentes, quanto às datas e edições. Por conseguinte, são estes os títulos dos livros selecionados para essa análise:

Livro A: **Física moderna** – TYPLER; LLEWELLYN

Livro B: **Fundamentos da Física**. – HALLIDAY; RESNICK; WALKER.

Livro C: **Física IV:** Ótica e física moderna**.** – YOUNG; FREEDMAN.

Livro D: **Ótica, relatividade e física quântica**. – NUSSENZVEIG.

Ressaltamos ainda que criamos o código alfabético *A, B, C* e *D,* para fazer referência a esses exemplares, respectivamente, durante a análise.

5.2 Critérios de análise

O Programa Nacional do Livro Didático (PNLD), do Ministério da Educação e Cultura (MEC), tem contribuído para a melhoria da Educação Básica através da disponibilização de obras didáticas para alunos das redes públicas escolares. O PNLD se constitui em um referencial balizador, capaz de nortear a qualidade dos livros ofertados e ajudar o professor na escolha do título mais adequado. Diferentemente dos livros voltados para a Educação Básica, o Ensino Superior não possui nenhum norteador específico para a análise dos livros adotados, de forma a estabelecer critérios ou estratégias que esses devam apresentar.

Na falta desse referencial, estabelecemos alguns critérios que, com base em nossa Fundamentação Teórica e Revisão de Literatura, mostram-se relevantes no balizamento das análises aqui realizadas. Além desses, utilizamos alguns critérios, sinalizados por Niaz et al. (2010), que visa trazer uma apreciação mais detalhada sobre esses materiais. Esses critérios têm foco no referencial histórico das ciências e da própria ciência. Assim, essa análise será dividida em duas etapas.

Em primeiro momento, analisamos a apresentação histórica do efeito fotoelétrico nos livros escolhidos, buscando verificar se há ou não inadequações históricas. Para isso, nos fundamentamos em nosso levantamento bibliográfico, construído a partir dos artigos originais, relativos aos cientistas que contribuíram para a elucidação desse fenômeno. Em segundo momento, analisamos como o livro apresenta o desenvolvimento científico, verificando se há ou não a presença de falsas analogias, como, por exemplo, a presença de mitos científicos, simplificações e distorções. Essas características são importantes para que possamos evitar que distorções se propaguem como sendo verdades incontestáveis, passando assim uma ideia equivocada acerca do fenômeno e do próprio conhecimento científico.

5.2.1. Critérios para análise da descrição histórica do fenômeno

Antes de analisar os livros, familiarizamo-nos com os principais cientistas que estudaram o fenômeno, com isso, elaboramos uma reconstrução histórica, em que enfatizamos as diferentes elucidações, permitindo-nos pontuar alguns critérios fundamentais ao seu desenvolvimento histórico e conceitual. Buscamos em Niaz et al.

(2010) outros critérios que terminaram por reforçar a discussão acerca de quatro importantes episódios, apresentados na forma de uma sequência organizacional, que contribuíram para a elucidação do fenômeno aqui realizada, conforme os parágrafos seguintes:

Hertz (1903) discute acerca das ondas eletromagnéticas e sua propagação. A atividade experimental por ele desenvolvida lhe permitiu controlar a criação das faíscas, afirmando que elas apresentavam um comportamento ondulatório em meios diferentes. O pesquisador conclui que a sua hipótese, de que a luz era um fenômeno eletromagnético, estava correta e poderia ser explicada por meio da teoria de Maxwell. Contudo, em nenhum momento, ele cita a "descoberta" nem o estudo do efeito fotoelétrico. Com base nessas informações, verificamos como esse episódio aparece nos livros didáticos de Física para o Ensino Superior, tendo como parâmetros: a) os estudos e a atividade experimental desenvolvidos por Hertz; b) a descoberta do efeito fotoelétrico não deve ser atribuída a Hertz.

Lenard (1902) apresenta a hipótese do gatilho, uma das explicações mais plausíveis para explicar o efeito fotoelétrico à época. Para essa explicação, ele apresentou algumas leis empíricas, mostrando que a velocidade dos elétrons ejetados é independente da velocidade da luz e admitindo que esses elétrons já possuam energia necessária para sua liberação, sendo a luz ultravioleta apenas um "gatilho" que liberará o elétron. Para que esse critério possa ser atingido, é necessário que os livros analisados apresentem os seguintes parâmetros: a) Lenard apresentava posição favorável à teoria ondulatória; b) a velocidade dos elétrons ejetados era independente da intensidade da luz; c) o elétron existente no interior do átomo já possuia energia necessária para sua liberação, acionada quando a luz ultravioleta atua sobre ele.

Em 1905, Einstein apresenta à comunidade científica um trabalho com um novo tratamento acerca da produção e tranformação da luz. Com esse trabalho, refuta a hipótese do gatilho de Lenard, ao discordar da explicação do efeito fotoelétrico, fundamentando-se na teoria ondulatória. Assim, a hipótese quântica é formulada, como uma alternativa de explicação desse fenômeno, supondo que se a luz é constituída de quanta localizada, então um elétron em um átomo só pode receber energia de um único quantum. Com base nessa hipótese, Einstein previu uma relação entre o potencial de frenamento e a frequência incidente sobre o metal, desconsiderando a influência da intensidade luminosa para a ejeção de elétrons.

Para que esse critério possa ser atingido, é necessário que os livros analisados apresentem os seguintes parâmetros: a) a hipótese quântica de Einstein era contrária à hipótese do gatilho de Lenard; b) Einstein explicou que a velocidade com que os elétrons são ejetados depende da frequência da luz incidente e não de sua intensidade; c) a luz consiste de quanta localizada de energia, então um elétron em um átomo só pode receber energia de um único quantum.

Millikan (1916) desenvolve um trabalho experimental durante dez anos, que tinha como intuito inicial a comprovação de que a teoria de Einstein estava equivocada. No entanto, após anos de estudo, ele conseguiu apresentar uma determinação experimental da equação fotoelétrica de Einstein e da constante de Planck, h. Para que esse critério possa ser atendido, é necessário que os livros consigam descrever os seguintes parâmetros: a) detalhes experimentais de determinação da quação Fotoelétrica de Einstein e da constante de Planck (h); b) o gráfico do potencial de frenamento X frequência da luz incidente, cuja inclinação fornece a constante de Planck.

Esses critérios foram estruturados principalmente a partir dos registros históricos elaborados por meio de uma reconstrução histórica sobre o efeito fotoelétrico, baseado em uma série de descobertas experimentais entrelaçadas com a sua interpretação acerca dos diferentes quadros teóricos. Para facilitar a compreensão e ser mais fiel ao ocorrido, é essencial que os livros sejam consistentes em delinear o processo de construção desse conhecimento, descrevendo os diferentes achados experimentais e suas interpretações.

5.2.2. **Critérios para análise da presença de inadequações**

Analisar a qualidade de um livro sob a perspectiva da história da ciência não é tarefa fácil, dada a dificuldade de normatizar parâmetros de valor. Após uma série de leituras, traçamos alguns critérios que nos permitiu delinear um consenso sobre o que pode ser considerado um material de teor satisfatório. De acordo com vários autores lidos (ALLCHIN, 2003; 2004; KUHN, 1998; MARTINS, 2005; SANTOS, 2006; WHITAKER, 1979; por exemplo), o processo de construção e desenvolvimento do conhecimento, geralmente, é marcado pelas crenças teóricas prévias, falta de conflito entre teorias, apresentação irreal dos acontecimentos, superficialidade, anedotas, entre outras inadequações. Desse modo, uma interpretação correta do fenômeno requer que as segintes situações sejam evitadas:

a) Apresentação do episódio histórico de forma puramente descritiva: Fenômeno apresentado apenas por uma sucessão de datas e nomes, bem como a ideia de uma ciência linear, desenvolvida por grandes gênios e que está imune ao erro.

b) Anacronismo: Texto analisado se apresenta de forma parcial e/ou tendenciosa. O texto é influenciado pelas concepções atuais, descartando o processo de construção daquele conhecimento.

c) Pseudo-histórias e mito: Presença de histórias fantasiosas que têm o intuito de idealizar o cientista como divindades ou descrever a história de forma instantânea e gloriosa.

d) Ausência de conflitos: As teorias lançadas são imediatamente aceitas por toda comunidade científica e há conformidade com a teoria vigente, portanto, não há tentativas de refutá-la.

e) Subdeterminação das teorias científicas por evidência experimental. Os experimentos não podem ser utilizados como uma forma de comprovar uma teoria. A atividade experimental pode ser alterada pelo cientista e moldada a fim de alcançar o resultado desejado. Assim, não podemos considerar que uma teoria é correta porque possui prova experimental.

Portanto, esses são os parâmetros que utilizamos na confecção da análise dos livros didáticos descritos, cujo objetivo principal é buscar identificar a possível presença de inadequações históricas, falsas analogias, permeadas pela presença de distorções, simplificações e equívocos. Obviamente, há outros critérios que poderiam ser utilizados e analisados, no entanto, fogem ao escopo deste trabalho.

5.3 Resultados das análises

Nesse primeiro ponto, utilizamo-nos da análise do conteúdo histórico como principal ferramenta de pesquisa. Buscamos verificar como os livros em questão exploram e

explicam a construção dos conceitos físicos referentes ao efeito fotoelétrico. Esperamos que esses conteúdos sejam apresentados como um processo de produção cultural do conhecimento, evitando resumi-la a biografias de cientistas ou a descobertas isoladas. Diante da vastidão de conteúdos que podem ser analisados, elencamos alguns que julgamos mais relevantes para termos um maior aprofundamento. Posteriormente discutimos sobre a possível presença de inadequações.

Livro A

O Livro A inicialmente traz uma discussão sobre o efeito fotoelétrico com a apresentação histórica do fenômeno. Os autores comentam sobre as contribuições de Hertz para a comprovação da teoria ondulatória, defendida por Maxwell e sobre a primeira observação para o fenômeno. Felizmente, a descoberta do efeito fotoelétrico não é atribuída à Hertz, e no livro é discutido apenas que ele fez essa observação.

Os autores parecem utilizar o trabalho original de Hertz para fundamentar seu trabalho; isso pode ser percebido na forma como os discursos são estruturados, contudo, não é citada a fonte utilizada. A possível utilização de documentos originais pode ser percebida em vários momentos, como é o caso da seguinte colocação:

> Em uma série de experimentos para estudar os efeitos da ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas, que executei e publiquei recentemente, duas centelhas elétricas eram produzidas pela mesma descarga de uma bobina de indução e, portanto, ocorriam simultaneamente. (TYPLER; LLEWELLYN, 2009; p. 88)

No que se refere ao trabalho do Phillip Lenard, percebemos que o livro apresenta também um desenvolvimento histórico coerente, porém, ele não cita o termo “hipótese do gatilho” proposta por Lenard, mas as leis empiricamente desenvolvidas por ele para elucidação do fenômeno são apresentadas e discutidas ao longo do texto. No livro, há a representação esquemática do aparato experimental originalmente utilizada por Lenard, no entanto, de forma um pouco mais simplificada e sem a explicação do funcionamento do aparato, como pode ser percebido na Fig. 1.

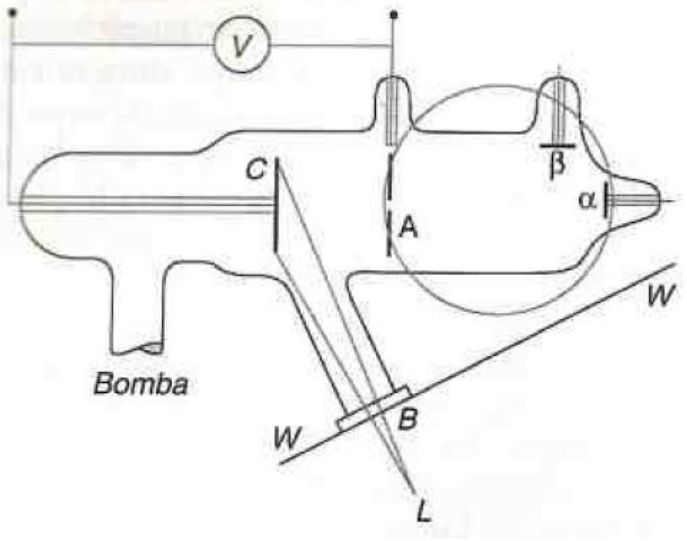

Figura 1: Representação esquemática do equipamento usado por Lenard para observação e estudo do efeito fotoelétrico. (TYPLER; LLEWELLYN, 2009; p. 88)

Um fato que merece destaque nesse livro são as citações feitas com base nos trabalhos originais, em especial, aos trabalhos de Lenard. No que se refere à apresentação da teoria de Einstein, o livro comete alguns pequenos equívocos, como pode ser percebido nesse trecho:

> Einstein propôs que a quantização de energia usada por Planck no problema do corpo negro fosse uma característica universal da luz. Em vez de estar distribuída uniformemente no espaço no qual se propaga, a luz é constituída por quanta isolados de energia hf. Quando um desses quanta, denominados *fótons*, chega à superfície do catodo, toda sua energia é transferida para um elétron (TYPLER; LLEWELLYN, 2009; p. 89).

Em primeiro momento, destacamos que Einstein não escreveu seu trabalho baseado na teoria de Planck, mas, na teoria da radiação de corpo negro proposta por Wien (EINSTEIN, 1905). Como Einstein não descreveu um valor para esse quanta de energia respaldado nos valores estabelecidos por Planck, não usou a constante "h". Outra inconsistência presente nesse trecho é a utilização do termo *fóton*, pois este nunca foi utilizado por Einstein.

Acerca da verificação experimental para o fenômeno, o livro afirma que Einstein apresenta em seu trabalho uma comprovação para a equação fotoelétrica, mas não

confirma sua teoria, como de fato pode ser percebido em Millikan (1916). Os autores mostram que o valor obtido experimentalmente por este estudioso é muito próximo ao valor definido para a constante de Planck e traz um gráfico (simplificado) dos resultados por ele obtidos. Posteriormente, o texto traz uma discussão sobre o fato de o efeito fotoelétrico estar em desacordo com a teoria clássica, pois, considerar que a ejeção de elétrons ocorre instantaneamente não é permitido classicamente. Por fim, o livro apresenta a história do efeito fotoelétrico de forma simplificada, mas coerente com os trabalhos originais, embora cometa alguns deslizes, discutidos a seguir:

Algumas considerações sobre as inadequações

O conteúdo histórico apresentado no livro A não comete erros graves sobre a descrição histórica do fenômeno e exibe como ponto positivo a apresentação de argumentos baseados nos trabalhos originais dos cientistas envolvidos. No entanto, por apresentar documentos originais, espera-se que os autores tragam o conteúdo de forma mais consistente, o que não é percebido ao longo do texto, visto que o assunto é tratado de forma superficial, não apresentando aprofundamento dos conteúdos, nem argumentações sobre o fenômeno. Embora citado no livro que o fenômeno não poderia ser explicado classicamente, as divergências entre a teoria ondulatória e corpuscular não são abordadas, bem como teorias alternativas para sua explicação não são apresentadas.

A história do fenômeno é exposta de forma fragmentada, desencadeando o entendimento de que cada episódio teria ocorrido isoladamente, podendo ser inserido em determinado espaço de tempo. Os trabalhos de Hertz, Lenard, Einstein e Millikan aparecem ao longo do texto. Contudo, nenhum outro cientista é citado, fazendo-nos crer que não houve nenhuma outra contribuição para a elucidação desse fenômeno; bem como a apresentação de uma história que se desenvolve sem conflitos e sem problemas. Aliás, alguns anacronismos são apresentados, principalmente no que se refere à teoria de Einstein, quando se utiliza os termos fóton e efeito fotoelétrico, ou associando trabalho dele ao de Planck, o que explica o uso recorrente da constante (h).

Por fim, destacamos que o livro traz uma supervalorização da atividade de experimento, quando comenta sobre a comprovação experimental da teoria de Einstein realizada por Millikan. Isso nos faz crer que existe a possibilidade de aceitação ou rejeição

de uma teoria por meio da atividade experimental, não comentando que ela aparece na ciência como uma representação de uma teoria e não uma forma de validá-la ou refutá-la.

Livro B

O livro se inicia com uma breve descrição atual para o efeito fotoelétrico e comenta que seu princípio pode ser utilizado na atualidade para diversos equipamentos tecnológicos. Posteriormente, é apresentado um experimento, intitulado pelos autores como o primeiro para o estudo do efeito fotoelétrico.

A descrição do experimento é frágil. Os autores colocaram uma figura, aparentemente atual, para ilustrar o aparato experimental (Fig. 2), mas não apresentam nenhuma explicação sobre ele. O estado físico não é descrito, bem como as variáveis e os procedimentos realizados também não são. São utilizados termos estranhos como: "contato deslizante", "coletor", "ligeiramente negativo", "alvo", entre outros, o que acaba dificultando o entendimento, porque não são termos usuais e não há nenhuma descrição sobre eles.

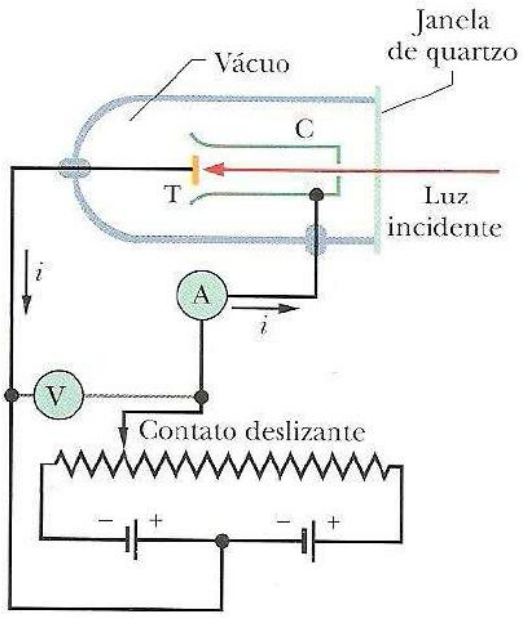

Figura 2: Esquema utilizado para descrever experimentalmente o efeito fotoelétrico. (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 1999; p.188)

Apesar de não haver clareza na descrição dos procedimentos realizados para executar o experimento, os autores trazem algumas considerações sobre ele. Percebe-se, entretanto, que o livro apresenta uma descrição muito pobre, marcada por uma estética fraca e sem argumentos consistentes. Os termos utilizados e os argumentos construídos são apresentados em uma linguagem e estrutura simplórias, como pode ser percebido na seguinte citação:

> Os experimentos mostram que para uma luz de uma dada frequência o valor $K_{máx}$ não depende da intensidade da luz incidente no alvo. Quer seja o alvo iluminado por uma luz ofuscante quer seja iluminado por uma vela, a energia cinética máxima dos elétrons ejetados tem sempre o mesmo valor (...).(HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 1999; p. 188)

Na sequência, os autores argumentam sobre a impossibilidade de se ter uma explicação para esse fenômeno baseado em leis clássicas, destarte, não se poderia tratá-lo como sendo regido pela teoria ondulatória. Posteriormente, o livro discute sobre a equação do efeito fotoelétrico e comete alguns equívocos ao afirmar que "Einstein resumiu os resultados dos experimentos do efeito fotoelétrico na equação: $hf = K_{máx} + \Phi$" (p.189). Einstein não utilizou a constante de Planck em seu trabalho e as demais variáveis também são apresentadas de forma diferente. Para os autores, essa equação é:

> (...) a aplicação da lei de conservação da energia à emissão fotoelétrica de um elétron por um alvo com uma função trabalho Φ. (...) Nas circunstâncias mais favoráveis, o elétron pode escapar do alvo sem perder energia no processo; nesse caso, ele aparece fora do alvo com maior energia cinética possível $K_{máx}$. (HALLIDAY, RESNICK, WALKER, 1999; p. 189)

A estrutura com que os argumentos são apresentados é dúbia. Em nenhum momento os autores explicam o que denominam de "alvo", ocasionando um texto incompreensível. A título de especulação, em alguns pontos, o referido termo poderia ser o próprio fóton; em outros, como é o caso da última oração da citação acima, ele poderia ser a superfície metálica utilizada no experimento.

O livro recorre aos aspectos históricos apenas para descrever experimentalmente o fenômeno. A evolução deste não aparece ao longo do texto, sendo citado apenas o nome de

Einstein como o responsável por sua explicação. Em síntese, a equação se apresenta de forma equivocada, já que Einstein não utilizou esses termos.

Algumas considerações sobre as inadequações

Nesse livro, o conteúdo histórico apresentado é muito reduzido, e surge apenas como uma tentativa de reproduzir um experimento histórico. Nesse sentido, apenas o nome de Einstein é citado. Há grande influência do anacronismo. Em todo momento, percebe-se uma definição ou um conceito atual, mesmo que se trate de um episódio histórico. Acreditamos na possibilidade de que o entendimento atual do fenômeno possa facilitar a compreensão de sua história, contudo, observá-lo focado no conhecimento atual não é uma boa alternativa para esse estudo. Desse modo, consideramos que o conteúdo histórico presente nesse livro não possa ser considerado como oportuno para o estudo da história do efeito fotoelétrico.

Livro C

O livro se inicia com esta definição para o efeito fotoelétrico:

> O efeito fotoelétrico consiste na emissão de elétrons que ocorre quando a luz incide sobre uma superfície. Os elétrons absorvem energia da radiação incidente e, portanto, podem superar a atração das cargas positivas e ser liberadas da superfície. Essa atração produz uma barreira de energia potencial que geralmente mantêm os elétrons confinados no interior do material. (YOUNG; FREEDMAN, 2009, p.181. Grifo nosso).

Essa citação atenta para dois detalhes importantes: Em um, quando o autor comenta sobre a superfície, ele não define que é necessário haver uma superfície metálica para que o fenômeno ocorra. Ao utilizar o termo *superfície*, pode-se imaginar que o fenômeno ocorra em qualquer superfície, como a madeira, por exemplo, o que não é verdade. Em outro, o autor coloca que os elétrons absorvem energia. Essa também é uma informação equivocada, pois, sendo os elétrons partículas que não possuem estrutura interna, não é

possível admitir um processo de absorção pelo elétron, por haver apenas um processo de transferência.

Os autores seguem colocando:

> O efeito fotoelétrico foi observado inicialmente por Heinrich Hertz em 1887, que verificou que uma centelha passava de uma esfera metálica para outra quando suas superfícies carregadas eram iluminadas pela luz de outra centelha. A luz que incidia sobre as superfícies facilitava a liberação das partículas hoje chamadas de elétrons. (YOUNG; FREEDMAN, 2009 p.181. Grifo nosso).

O livro está coerente ao comentar sobre a verificação experimental feita por Hertz, sem atribuir a ele essa descoberta. No primeiro grifo apresentado na citação, os autores cometeram um equívoco ao utilizar o termo "luz de outra centelha", uma vez que o termo correto seria *luz ultravioleta*. Posteriormente, no segundo grifo, os autores tratam o termo elétron como se ele não fosse utilizado na época, o que é uma inverdade. Acreditamos que os autores estivessem falando dos fotoelétrons, ou simplesmente fizeram uma confusão com o termo *fóton*. Para nós, a explicação mais plausível para esses desajustes é ele ser advindo de erros de tradução, por serem erros grosseiros, mas com certo sentido dentro do texto.

Os autores citam emissão termoiônica, comentando brevemente o motivo pelo qual não se podia explicar o fenômeno por meio dessa teoria. Um trabalho que foi desenvolvido por Wallwachs e Lenard é citado e brevemente discutido, mas sem mencionar o trabalho mais importante de Lenard, em que ele explica o efeito fotoelétrico por meio da hipótese do gatilho. Ao longo do texto são citadas algumas equações atuais para o estudo do fenômeno, só que o autor atribui essas equações ao Lenard. De acordo com o trabalho original deste autor, podemos perceber que ele estabeleceu leis empíricas para o fenômeno, mas não contemplou equações para descrever o fenômeno.

No que se refere aos trabalhos de Einstein, o livro apresenta algumas inconsistências, iniciando pelo título da seção: *Teoria do fóton proposta por Einstein*, como já foi debatido ao longo desse trabalho, Einstein não utiliza o termo fóton. O livro ainda coloca:

> A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905. Desenvolvendo uma hipótese apresentada cinco anos antes por Max Planck. Einstein postulou que um feixe de luz era constituído por pequenos pacotes de energia, chamados fóton ou quanta. A energia E do fóton é igual a uma constante h vezes a frequência. (...) Um fóton que atinge uma superfície é absorvido por um elétron. Essa transferência é do tipo tudo ou nada, ou seja, o elétron ou ganha a energia total do fóton ou não absorve nenhuma energia (...). (YOUNG; FREEDMAN, 2009 p. 183. Grifo nosso)

Os autores relacionam a teoria de Einstein com a teoria de Planck, por esse motivo descreve uma energia como sendo igual a hf. Supostamente, a ideia de quantização de energia proposta por esses autores passa a ser interpretada como partindo de um mesmo princípio, e daí nasce o conflito dentro das teorias. Nesse sentido, é importante ressaltar que Planck escreve uma teoria de quantização de energia baseada na teoria ondulatória, mas a teoria de quantização de Einstein não pode ser explicada por meio dessa teoria, já que sua proposta rompia com os princípios clássicos. Portanto, assemelhar essas duas teorias e admitir que Einstein utilizasse a constante de Planck é um equívoco e deve ser evitado.

Por fim, destacamos novamente a utilização do termo *fóton* (embora os autores também usem o termo *quanta*) que não foi utilizada por Einstein e a questão da absorção de energia pelo elétron; como vimos em nossas referências, uma definição conceitualmente equivocada.

O autor comenta muito brevemente que Millikan realizou um trabalho experimental em que encontrou um valor para a carga elementar do elétron e para constante de Planck, porém não comenta sobre o experimento realizado, nem sobre outros cientistas que buscavam uma verificação experimental para o fenômeno.

Algumas considerações sobre as inadequações

Em primeiro momento, destacamos uma frase posta no livro: “A análise correta do efeito fotoelétrico foi feita por Albert Einstein em 1905 (p.183)”. Acreditamos que quando o autor admite que a teoria de Einstein estivesse correta, talvez ingenuamente, ele está descartando todas as outras teorias. É necessário lembrar que uma teoria é desenvolvida para resolver determinado problema em uma situação específica, podendo não ter validade geral para todo caso. A própria teoria de Einstein apresentava limitações, pois só poderia

ser utilizada em situações em que as leis de Wien fossem válidas. Portanto, atribuir os termos: certo ou errado implica atribuir um valor de superioridade de uma teoria em relação a outras. Isso tende a acarretar o anacronismo, pois a história passa a ser contada sob o ponto de vista da teoria aceita, descartando as demais teorias e, portanto, desconsiderando o processo de construção do conhecimento.

De uma maneira geral, o anacronismo marca fortemente o livro. Há momentos em que há a uma hibridização das concepções históricas e atuais de forma muito intensa, induzindo o leitor a não conseguir distinguir uma da outra, não ficando claro quando o autor fala do passado e da atualidade.

Livro D

O livro D apresenta uma quantidade de material histórico superior aos demais analisados, iniciando com uma descrição histórica do fenômeno. Ele comenta sobre o trabalho realizado por Hertz no intuito de demonstrar a validade das equações de Maxwell por meio da produção e detecção de ondas eletromagnéticas. A descrição do procedimento adotado por Hertz para realização dessa atividade também é apresentada coerentemente ao longo do texto:

> Heinrich Hertz produzia uma descarga oscilante fazendo saltar uma faísca entre dois eletrodos, para gerar as ondas, e detectava-as usando uma antena ressonante, onde a detecção também era acompanhada de uma faísca entre eletrodos. Ele observou que a faísca de detecção saltava com mais dificuldade quando os eletrodos da antena receptora não estavam expostos à luz (predominantemente violeta e ultravioleta) proveniente da faísca primária (...). (NUSSENZVEIG, 1998, p. 249)

Na sequência, o autor discute acerca do trabalho de Philipp Lenard e apresenta o esquema rudimentar (Fig. 3) de um aparato utilizado para verificação experimental do fenômeno. O funcionamento do experimento é explicado, pertinentemente, com descrição sobre cada variável que aparece no texto. O experimento é descrito de forma contemporânea, mas bastante fiel ao episódio histórico, da maneira como evidenciada na seguinte colocação:

> Numa experiência típica, os eletrodos estão dentro de uma ampola de quartzo (transparente à luz ultravioleta) evacuada, e se estabelece entre

> eles uma diferença de potencial V, iluminando depois o catodo com luz de frequência ν e intensidade I_0. Mede-se a corrente elétrica i assim gerada com o auxílio de um amperímetro. (NUSSENZVEIG, 1998, p. 250)

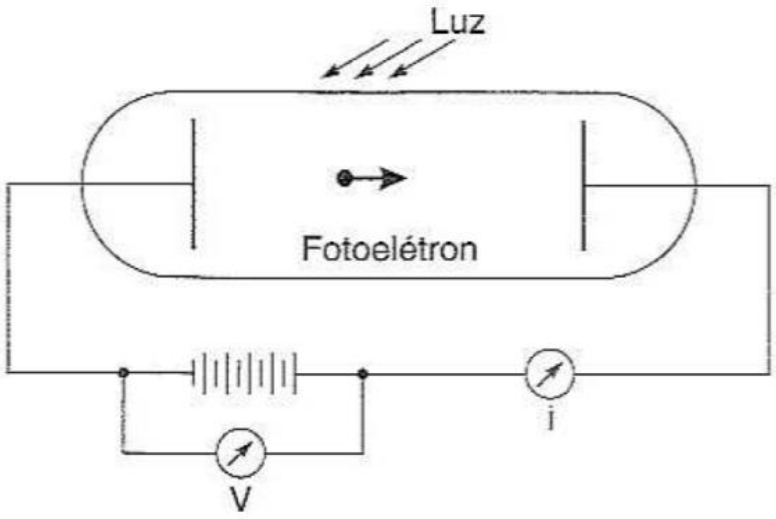

Figura 3 Aparato experimental para verificação do efeito fotoelétrico. (NUSSENZVEIG, 1998, p. 250)

O autor traz uma discussão atual do efeito fotoelétrico, intercalando com episódios históricos sempre que necessário. As descrições detalhadas sobre frequência, corrente e energia cinética, possivelmente, permitem a compreensão por parte do aluno. As argumentações trazidas induzem outros questionamentos como, por exemplo, a discussão do comportamento desse fenômeno e o porquê da impossibilidade de tratá-lo classicamente.

O livro retrata que as contribuições de Einstein para o fenômeno seria uma extensão audaciosa do trabalho de Planck. Já foi debatido nesse trabalho, por diversas vezes, que não há vínculo entre os trabalhos desses dois cientistas, contudo, quando o autor faz essa afirmação no livro, sua intenção parece ser mostrar que, assim como Planck, Einstein também parte da ideia de quantização; isso fica evidente devido uma nota de rodapé na página 252. Após isso, o autor comete um equívoco ao atribuir a Einstein a escrita de uma energia que seria fornecida dada por $E=h\nu$.

Por fim, o autor trata dos trabalhos desenvolvidos por Millikan. Ele comenta que este passou cerca de 10 anos realizando atividades experimentais no intuito de mostrar que o trabalho de Einstein estava equivocado. Ele utiliza o trabalho original de Millikan para mostrar que, contra suas próprias expectativas, este acaba por verificar que a equações de Einstein eram corretas. Discute que Einstein não utilizou o termo *fóton*, só utilizado a partir de 1926. Ele ainda cita outros pesquisadores que se dedicaram a comprovar o equívoco de Einstein.

Algumas considerações sobre as inadequações

Nesse ponto, o autor peca pelo uso de anacronismos, já que recorre a uma descrição do fenômeno de forma mais atual. Ao tratar de um episódio histórico, o problema dessas colocações é que descrever seus aspectos de forma incorreta se torna um erro considerável, pois o entendimento desse processo leva à compreensão do fenômeno.

5. Considerações Finais

A partir do desenvolvimento da nossa pesquisa ao longo dessa Dissertação, fomos capazes de nos apropriar de um maior conhecimento acerca do fenômeno que atualmente denominamos efeito fotoelétrico, a partir da análise dos trabalhos desenvolvidos por Hertz, Lenard, Einstein e Millikan, que se caracterizam como referenciais importantes na elucidação desse fenômeno. Esse conhecimento mais acurado nos permitiu traçar critérios de análises para que pudéssemos delinear como os livros adotados na Licenciatura em Física da UEPB, em especial na disciplina de Física Moderna e Contemporânea, discutem historicamente o episódio citado.

Nossos resultados não estão muito distantes daqueles apresentados pela literatura, quando a mesma nos alertava para a possível presença de inadequações e distorções históricas presentes nesses materiais. Assim sendo, ao analisarmos o contexto histórico sugerido em nossa pesquisa e posto nos livros aqui analisados, tomando certos critérios como referências, constatamos que em alguns desses livros, há a presença de erros graves na descrição histórica do fenômeno. Além disso, há uma série de inconsistências e superficialidades nos argumentos apresentados na descrição de como o fenômeno se desenvolveu, objetivados pela forma bastante resumida ou caracterizada pela excessiva simplificação e falta de contexto.

Com base em nossa fundamentação, verificamos, por exemplo, que existe certa incoerência ao afirmar que teria sido Hertz o descobridor do efeito fotoelétrico, assim como é uma falha descartar os trabalhos de Lenard para a elucidação deste estudo. Contudo, nos livros analisados essa é uma característica ainda presente. Esses livros também pecam muito frequentemente e com maior intensidade, pela simplificação exagerada. Alguns dos livros apresentam trechos baseados em documentos originais, mas, mesmo assim, a construção de argumentos é muito fraca e superficial.

A apresentação da evolução histórica do fenômeno, na maioria das vezes, é complicada e equivocada. Os livros apresentam um progresso no desenvolvimento do fenômeno que não aconteceu na prática. As descobertas científicas são apresentadas de forma desorganizada, ou seja, não apresentam uma sequência lógica e nem um intervalo de tempo

cabível, fazendo parecer, na maioria das vezes, que um dado fenômeno ocorre instantaneamente, que as respostas às grandes descobertas são resolvidas por uma progressão livre de problemas e que sua explicação teoricamente nasce de um lampejo de ideias, advindas de cientistas geniais.

Após uma análise detalhada, qualificamos os anacronismos como um dos maiores problemas na reconstrução do fato histórico aqui conduzido. Esses anacronismos foram encontrados em todos os livros analisados. Alguns são visivelmente utilizados a fim de produzir um conhecimento mais acessível, outros, no entanto, acaba nos passando uma ideia completamente equivocada, pois nos induz a crer em uma ciência linear, fragmentada e que se desenvolve sem nenhum problema.

Recomendamos fortemente que, a exemplo do que fizemos em nossa fundamentação, a apresentação histórica de qualquer fenônemo físico em livros didáticos, deva ser conduzida de forma a contemplar todos os aspectos que contribuiram para o entendimento do mesmo, enfatizando erros e acertos, evitando-se anacronismos e uma historia linear e "mágica". Em outras palavras, detalhes históricos não têm de ser apresentados em seções especiais ou notas de rodapé ou barras laterais dos livros didáticos, mas, podem ser utilizados, sempre que possível, para facilitar a compreensão dos conteúdos estudados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD-EL-KHALICK F., LEDERMAN, N. G. The influence of history of science courses on students views of nature of science. **Journal of research in science teaching** vol. 37, no. 10, pp. 1057-1095 (2000).

ALLCHIN, D. Pseudohistory and Pseudoscience. **Science & Education** v.13, n. p. 179-195, 2004.

ALLCHIN, D. Scientific myth-conceptions. **Science Education**, v. 87, n. 3, p. 329-351, 2003.

ALVARGONZÁLEZ, D., Is the history of science essentially whiggish? **Science History Publications Ltd**, 2013

BARDIN, L. Análise de conteúdo (L. de A. Rego & A. Pinheiro, Trads.). Lisboa: Edições 70, 2006.

BASTOS FILHO, J.B. Qual história e qual filosofia são capazes de melhorar o ensino de Física? In: PEDUZZI L.O.Q., MARTINS, A.F.P., FERREIRA J.M.H. **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino.** Natal – RN: Editora EDUFRN, 2012.

BRASIL, Secretaria de Educação Fundamental. **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MC/SEF, 1999.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio).** Parte III – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, DF: MEC, [1999 ou 2000]. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2015.

CARVALHO. C.; **A história da indução eletromagnética contada em livros didáticos de física.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CAVALCANTI, M. A. et al. Uma aula sobre efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades. **Física na escola**, v.3, n.1, 2002.

DESHMUKH. P. C. & VENKATARAMAN.S. 100 Years of Einstein´s Photoelectric effect. Departament of Physics. Indian Institute of Thecnology – Madras, Chennai – 600 036, Wednesday, November 22, 2006.

DORE, S., Efeito fotoelétrico: pode o elétron absorver um fóton? Disponível em: http://www.if.ufrj.br/~dore/FisRad/fotoelet.pdf. Acesso em 23 de novembro de 2015. (notas de aula)

DU BRIDGE, L. A.; EPSTEIN, A. P. **Robert Andrews Millikan (1868-1953): a biographical memoir.** National Academy of Sciences, Washington D.C. Copyright 1959.

EINSTEIN, A. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. **Annalen der Physik**, vol. 17, p. 132-148, 1905.Disponível em < http://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans > Translated Anna Beck. Acesso em 20 de outubro de 2014.

TEIXEIRA, E.S.; GRECA, I.M.; FREIRE JR,O. Uma revisão sistemática das pesquisas publicadas no Brasil sobre o uso didático de História e Filosofia da Ciências no Ensino de Física. **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino** / Luiz O. Q. Peduzzi, André Ferrer P. Martins e Juliana Mesquita Hidalgo Ferreira (Org.). – Natal: EDUFRN, 2012.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

HALLIDAY, RESNICK, WALKER. **Fundamentos da Física**. v.. 4. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HERTZ, H. R., Electric waves: Being Researches on the propagation of electric Action With Finite Velocity Through Space . London; Macmillan and Co, 1893.

JAMES, A.N. (1973). Photoelectric effect, a common fundamental error. **Physics Education,** *8*(6), 382-384.

JAMMER, M. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**, McGraw-Hill, New York, 1966.

KLASSEN, S. The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom. **Science & Education**, v.18, p. 593-607, 2009b.

KRAGH, H. **An introduction to the historiography of science.** Cambridge: New York, 1989.

KUHN. T. **Black body theory and the quantum descontinuity 1894-1912**. The University of Chicago Press. Chicago & London, 1987.

KUHN, T. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. [1962]. Ed Perspectiva, São Paulo, (1998).

LACEY, H. Valores e atividade científica. São Paulo, Discurso Editorial, 1998.

LEITE, L. History of science in science education: Development and validation of a checklist for analyzing the historical content of science textbooks. **Science & Education**, v. 11, n. 4, p. 333-359, 2002.

LENARD, P."Uber die lichtelektrische Wirkung." *AP*, 5 **Leipzig**, (1902), 149-198.

LENARD.P.E.A.V. On cathode rays. **Nobel lecture**, may 28, 1906. p.105-134.

MANGILI, A. I. **Heinrich Rudolph Hertz e o Efeito Fotoelétrico**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade de São Paulo, 2011.

MANGILI, A. I. Heinrich Rudolph Hertz e a descoberta do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula. **História da ciência e ensino: construindo interfaces**. v.6, p. 32-48, 2012.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARTINS, A.F.P. História e filosofia da ciência no ensino: há muitas pedras nesse caminho... **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 24**,** n. 1, p. 112-131, 2007.

MARTINS, L A-C. P. História da ciência: objetos, métodos e problemas. *Ciência & Educação,* v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, R. A. Sobre o papel da história da ciência no ensino. **Boletim da Sociedade Brasileira de História da Ciência**, v. 9, p. 3-5, 1990.

_____. ¿Que es descubrimiento cientifico de um nuevo fenómeno? In: SOTA, Eduardo & URTUBEY, Luis (eds.) Epistemología e Histotia de la Ciência. Córdobra: Universidad Nacional de Córdobra, 1999. Vol. 5 (n.5), pp. 281-288.

_____. A maçã de Newton: História, Lendas e Tolices. In: SILVA, C. C. **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

_____. **História da Teoria Quântica**: a dualidade onda-partícula, de Einstein a De Broglie. Editora Livraria da Física. São Paulo, 2014.

MATTHEWS, M. R. **Science Teaching - The Role of History and Philosophy of Science.** New York: Routledge, 1994.

MATTHEWS, M.R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p.164-214, 1995.

MAYR, E. When is historiography whiggish? **Studies in History and Philosophy of Science** 21: 301-309, 1990.

MILLIKAN, R. A.; "A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h", **Physical Review**, Second Series, vol. VII, n° 3, p. 355-388, (1916).

MILLIKAN, R.A. The electron and the light-quant from the experimental point of view. **Nobel Lecture**, May 23, 1924.

MINAYO, M. C. S. *et al.* **Teoria, método e criatividade.** 27. ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

NIAZ, M et al. **Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and its Implications for General Physics Textbooks**. Wiley Online Library, Canada, 2010.

NUSSENZVEIG, M**. Ótica, relatividade e física quântica**. Curso de Física básica. São Paulo: Blucher, 1998

PAGLIARINI, C.R. **Uma analise da história e filosofia da ciência presente em livros didáticos de Física para o ensino médio.** 115f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

PATTON, M. Q. **Quantitative research and evaluation methods.** 3. ed. California: Sage Publications, Inc; 2002.

RICHARDSON, R. J *et al.* **Pesquisa social:** métodos e técnicas. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

ROSA, P.S. **Louis de Broglie e as ondas de matéria.** Dissertação de mestrado. UNICAMP, Campinas, SP, 2004.

SANTOS. S.M.O. **Critérios para Avaliação de Livros Didáticos de Química para o Ensino Médio**. 2006. 235f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Física e Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SHAMOS M. H. **Great experiments in physycs**: Firsthand Accounts from Galileu to Einstein. Copyright. Courier Dover Publications, 1987.

SEGRÉ. E. **Dos raios X aos quarks:** Físicos modernos e suas descobertas. Editora Universidade de Brasília, 1987.

TAVOLARO, C. R. C; CAVALCANTE, M. A. **Física Moderna e Experimental**. Ed. Manole, Barueri, SP. 2001.

TRIVIÑOS, A. Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação. São Paulo: Atlas, 1987.

TYPLER, Paul A.; LLEWELLYN, Ralph A. **Física moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999

VIDEIRA, A. A. P.; COELHO, R. L., **Física mecânica e filosofia: o legado de Hertz**. Ed. UERJ, Rio de Janeiro, 2012.

WHEATON, B. R. **The tiger and the shark: Empirical roots of wave-particle dualism**. Cambridge, England: Cambridge University Pres, 1983.

WHITAKER, M. A. B. History and quasi-history in physics education. Part I, **Physics education**, vol. 14, p. 108 – 112, 1979.

YOUNG; FREEDMAN. **Física IV:** Ótica e física moderna**.** v. 4. 12. ed.. Rio de Janeiro: LTC, 2009. (Título original: *Sears and Zemansky*)