



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

JOANA MENARA SOUZA SOARES

**ANÁLISE HISTÓRICA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM
LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

**CAMPINA GRANDE – PB
2014**

JOANA MENARA SOUZA SOARES

**ANÁLISE HISTÓRICA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM
LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Licenciatura em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

CAMPINA GRANDE – PB
2014

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 histórica do efeito fotoelétrico em livros didáticos de Física do Ensino Médio [manuscrito] / Joana Menara Souza Soares. - 2014.

45 p. : il.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, Departamento de Física".

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


21. ed. CDD 530


JOANA MENARA SOUZA SOARES


**ANÁLISE HISTÓRICA DO EFEITO FOTOELÉTRICO EM
LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA DO ENSINO MÉDIO**

Monografia apresentada ao curso de
Graduação em Licenciatura em Física do
Centro de Ciências e Tecnologia da
Universidade Estadual da Paraíba, como
requisito parcial para obtenção do título
de licenciado em Física.

Aprovada em 18/07/2014.


Prof. Dr. Marcos Antônio Barrós / UEPB
Orientador


Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins / UEPB
Examinador interno


Prof. Dr. Danieverton Moretti / UFCG
Examinador externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pois nele encontrei refúgio em todos os momentos, dando-me coragem, paciência, sabedoria e entendimento que me permitiram seguir adiante com minhas pesquisas e continuar lutando pelos meus objetivos, sem desistir diante de todas as adversidades que surgiram ao longo do percurso. Aos meus pais, pela dedicação e paciência durante esse processo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela oportunidade de estar conquistando mais uma meta em minha vida.

A meu pai Martinho Soares pela dedicação prestada durante toda minha vida e à minha mãe Maria Lins, mulher forte e determinada, que me serve de espelho em todos os momentos de minha vida, e cujos ensinamentos que me guiará por toda minha vida. Aos meus irmãos familiares próximos que de alguma forma contribuíram para que este sonho se realizasse. A estes os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, pela paciência, incentivo e dedicação, que foram fundamentais para elaboração e conclusão deste trabalho. Agradeço também por todos ensinamentos que me nortearão por toda minha carreira profissional.

Ao Prof. Dr. Danieverton Moretti e ao Prof. Dr. Roberto Martins, pela disposição para compor a banca examinadora.

Ao meu avô Manuel Lins (In memoria), que me serve de exemplo de honra, fé e lealdade. Mesmo fisicamente ausente, sentir sua presença me dá forças para continuar.

Aos meus amigos do curso de Física, pelos momentos de companheirismo e estudo. Pela força dada nos momentos difíceis. No entanto, a ajuda mútua entre amigos me fez seguir adiante apesar das inúmeras dificuldades e contratemplos a cada semestre.

Enfim, a todos aqueles que colaboram direta ou indiretamente para que este trabalho acontecesse. Àqueles que acreditaram em mim, muito obrigado!

RESUMO

Notadamente, muito se tem discutido sobre a presença e a importância da História da Ciência (HC) no ensino de Física. 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. Percebe-se, por outro lado, que alguns desses trabalhos não chegam ao professor, deixando-os a mercê de histórias distorcidas ou simplificadas, presentes na maioria dos livros didáticos, o que termina por reforçar alguns conhecidos mitos científicos e transmitindo falsas concepções históricas a estudantes e professores, como nos revela a literatura. Assim, considerando 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 a presença dessa inter-relação nos livros didáticos de Física do Ensino Médio, verificando se há ou não uma transposição histórica adequada, sobre o efeito fotoelétrico.

Com a intenção de buscar subsídios para uma discussão mais profunda acerca desse fenômeno, analisamos oito livros de Física, dentre os quais três são indicados pelo Programa Nacional do Livro do Ensino Médio (PNLEM, 2009). Essa análise foi baseada em alguns critérios sinalizados por Niaz et al, 2010, que levam em consideração a qualidade do conteúdo histórico existente, notadamente sobre os indícios de mitos científicos sobre o fenômeno em questão, além de relatos bibliográficos distorcidos sobre os cientistas envolvidos. Nossos resultados apontam que alguns desses critérios são ignorados, distorcidos ou relegados a pequenas informações históricas, sem ênfase nas descrições dos experimentos originais e inconsistentes nos relatos bibliográficos dos cientistas envolvidos.

Palavras-chave: Efeito fotoelétrico; história da Ciência; livros Didáticos de Física.

ABSTRACT

Notably, much has been discussed about the presence and importance of the History of Science (HC) in the teaching of physics. Associated with this premise, we have seen an increasing production of academic papers, in which he has emphasized an inserted content in this discipline historical and philosophical approach. It is clear, moreover, that some of these studies do not reach the teacher, leaving them at the mercy of distorted or simplified, present in most textbooks, which ends up reinforcing some known scientific myths and historical conceptions broadcasting false stories students and teachers, as revealed in the literature. Thus, considering the possibility of using HC in education and the importance of teaching a content related to a modern physics dictates, it becomes relevant to examine the presence of this relationship in Physics textbooks of high school, checking whether or not an adequate historical transposition, on the photoelectric effect.

With the intention of seeking grants for further discussion of this phenomenon, we analyzed eight books of Physics, among which three are appointed by PNLEM (2009). This analysis was based on some criteria indicated by Niaz et al 2010, which take into account the quality of the existing historical content, especially on the scientific evidence about the phenomenon in question myths, plus bibliographic distorted reports on the scientists involved. Our results indicate that some of these criteria are ignored, distorted or relegated to small historical information, without emphasis on original and inconsistent descriptions of experiments in bibliographic reports of the scientists involved.

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

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	9
2.0	METODOLOGIA.....	12
2.1	Pesquisa qualitativa.....	12
2.1.1	Estudo de caso.....	13
2.1.2	Documentos.....	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1	Breve contextualização.....	16
3.2	A possível descoberta do efeito fotoelétrico por Hertz e sua caracterização.....	17
3.3	As contribuições dadas por Phillip Lenard para o estudo do efeito fotoelétrico.....	21
3.4	Papel revolucionário de Einstein sobre o quantum de luz e sua explicação para o efeito fotoelétrico.....	24
3.5	A verificação experimental do efeito fotoelétrico, realizada por Millikan..	28
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS LIVROS DIDÁTICOS.....	32
5	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

A escolha do tema de pesquisa deste trabalho monográfico¹ está diretamente relacionada a situações vivenciadas ao longo da nossa vida estudantil e das nossas atividades como professora no Ensino Médio, especificamente, na Escola Estadual de Ensino Fundamental Teodósio de Oliveira Lêdo, em Boa Vista, PB, onde leciono há três anos. Durante a nossa formação em Licenciatura em Física, tivemos a oportunidade de discutir alguns fundamentos históricos relativos à Mecânica Clássica (MC) e início da Física Moderna, com um Educador e Historiador², que nos apresentou uma visão histórica diferente daquela que tínhamos a partir dos livros didáticos de Física. Suas aulas e seus artigos, em especial Martins (2006), caíram como uma bomba sobre as “histórias” que para nós pareciam uma verdade incontestável, presentes nos livros didáticos, e repetidas ao longo das nossas aulas no Ensino Médio.

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 estéril, 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 transmitindo falsas concepções históricas a estudantes e professores. Associado a essa premissa, temos visto uma crescente, mas não suficiente produção de trabalhos acadêmicos (FREIRE JR., et al, 2012), na qual se têm enfatizado abordagens históricas de boa qualidade, inseridas a conteúdos de Física. Percebe-se, por outro lado, que esses trabalhos não chegam aos professores do Ensino Médio, deixando-os a mercê dessas estórias fantasiosas e simplificadas já mencionadas.

Em oposição a essa literatura, o Programa Nacional do Livro do Ensino Médio (PNLEM, 2009), revela que a maioria dos livros didáticos de Física utilizados atualmente, passou por mudanças e inovações, norteando seus conteúdos para uma HC mais significativa, a partir de objetivos oportunizados pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs). Assim, diante desse quadro, propusemos o seguinte questionamento:

¹ Aceito para apresentação oral no 2d International Congress of Science Education and 15 years of the Journal of Science Education, em Foz do Iguaçu, PR.

² Prof. Dr. Roberto de Andrade Martins.

- Há uma transposição histórica adequada, sobre o efeito fotoelétrico, em livros didáticos de Física no Ensino Médio?

Buscando responder a essa questão, inicialmente, recorreremos à literatura (LEITE, 2002; PAGLIARINI, 2007; KLASSEN, 2009b; NIAZ et al, 2010) que aponta para lacunas e inadequações presentes em conteúdos históricos incluídos nos livros didáticos de física, no que se refere aos ensinamentos do efeito fotoelétrico. Assim, considerando 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 a presença dessa inter-relação nos livros didáticos. Com o intuito de levantar essas questões, este estudo de caso tem como objetivo geral:

- Analisar a evolução histórica do efeito fotoelétrico apresentadas por alguns livros didáticos de Física para o Ensino Médio.

Além desse, temos os seguintes objetivos específicos:

- Fundamentar os aspectos históricos do efeito fotoelétrico;
- Delinear os livros didáticos de Física do PNLEM que apresentam qualidade no aspecto histórico do efeito fotoelétrico.

Entendemos ser importante a análise histórica do fenômeno em questão e sua abordagem em livros didáticos, já que os mesmos se constituem em uma das ferramentas balizadora que assume o papel principal 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.

Este trabalho monográfico se encontra dividido em cinco capítulos, contemplando todos os processos de desenvolvimentos sugeridos por seus respectivos objetivos. No segundo capítulo, chamado de metodologia, descrevemos de forma detalhada o procedimento metodológico de nosso estudo, em que foi priorizada a abordagem qualitativa. A opção por essa abordagem ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, permitindo-nos descrever, compreender e analisar como se dá o perfil histórico contemplado pelos

livros didáticos de física sobre o efeito fotoelétrico. Trata-se de um estudo de caso, que se utiliza da análise de conteúdo, como ferramenta de pesquisa.

O terceiro capítulo é dedicado à fundamentação teórica. Nesse capítulo, realizamos um levantamento dos fundamentos históricos que pontuaram a origem do efeito fotoelétrico, a partir de Hertz, em 1886, até Millikan, em 1916, com sua comprovação experimental. Mesmo não tendo como objetivo aprofundar-se no aspecto teórico sobre o tema aqui discutido, esse capítulo apresenta uma evolução histórica sobre o fenômeno em questão. Para isso, tomamos como fonte de pesquisa alguns livros e artigos originais e secundários (HERTZ, 1886 Apud NIAZ et al, 2010; LENARD, 1905; EINSTEIN, 1905; MILLIKAN, 1914; SHAMOS, 1987; BASSALO, 1996; BASSALO, 2000; KRAGH, 1999; MANGILI, 2012) que são balizadores pertinentes a essa perspectiva.

No quarto capítulo, aqui chamado de discussão e análise dos resultados, analisamos oito livros didáticos de Física do Ensino Médio, buscando verificar como as narrativas históricas sobre o efeito fotoelétrico são apresentadas, em especial àqueles que tiveram seus títulos analisados por um importante norteador educacional brasileiro, o PNLEM. Essa análise foi baseada em alguns critérios sinalizados por NIAZ et al. (2010), que levam entre outras considerações a qualidade do conteúdo histórico existente, notadamente sobre os indícios de mitos científicos relacionados ao fenômeno em questão, além de relatos bibliográficos distorcidos sobre os cientistas envolvidos. Por fim, no último capítulo, apresentamos nossas considerações acerca do contexto histórico aqui analisado, notadamente pontuando para uma adequação ou não da evolução do efeito fotoelétrico, obedecendo ao que propomos em nossa fundamentação.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo, descrevemos a metodologia seguida em nosso estudo. Optamos pela abordagem qualitativa, em decorrência do enfoque dado ao objeto a ser estudado.

2.1 Pesquisa qualitativa

Visando alcançar os objetivos propostos neste estudo, privilegiamos a abordagem qualitativa, a qual, segundo Richardson et al. (2008, p. 80),

[...] 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.

A pesquisa qualitativa se ocupa com um nível de realidade que não pode ou não deveria ser quantificado, ou seja, esse tipo de pesquisa, como ressalta Minayo (2008), 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, precisa ser descrito e analisado pelo pesquisador.

A pesquisa qualitativa está sendo usada no meio acadêmico, como uma nova perspectiva de produção de conhecimento, por meio de uma interação entre o pesquisador e os atores sociais. Assim, esse tipo de abordagem facilita compreender em profundidade alguns fenômenos do processo ensino-aprendizagem, tornando-se, portanto, uma referência para investigar diferentes contextos. No nosso caso, o foco principal de estudo refere-se a como se dá o processo de transposição histórica sobre o efeito fotoelétrico em livros didáticos de Física do Ensino Médio, especificamente os apontados pelo PNLEM (2009). Acreditamos que a relevância desta pesquisa reside no fato de que a literatura (LEITE, 2002; PAGLIARINI, 2007; KLASSEN, 2009b; MANGILI, 2012) nos norteia para lacunas e inadequações presentes em conteúdos históricos incluídos nos livros didáticos de física, no que se refere aos ensinamentos do efeito fotoelétrico.

No âmbito do paradigma qualitativo, podem ser realizadas pesquisas de tipos variados: etnográfica, estudo de caso, participativa, histórica e outros. Neste trabalho, utilizamos o *estudo de caso*, cuja justificativa será descrita a seguir.

2.1.1 Estudo de caso

A característica básica de um estudo de caso é apresentar, heurísticamente, situações vivenciadas por indivíduos em grupos, em um contexto real, em que múltiplas fontes de evidências são expostas, oferecendo informações várias sob “background” teórico que determina o estudo em questão. Segundo Patton (2002), “os estudos de caso são particularmente úteis quando se pretende compreender determinados indivíduos, determinado problema ou uma situação particular, em grande profundidade, sem favorecer a generalização” (p. 55) ³.

Apoiado nessa descrição teórica, caracterizamos nossa pesquisa como um estudo de caso, tendo em vista que procuramos esclarecer e compreender como se dá o processo de informação, em relação à evolução histórica do efeito fotoelétrico, em livros didáticos de Física para o Ensino Médio.

Notadamente, não podemos dizer que as descrições realizadas na nossa fundamentação teórica, bem como as análises dos livros didáticos aqui apresentados sejam universais, e que a partir deles podemos ter um processo conclusivo em relação aos propósitos iniciais. São muitas as variáveis envolvidas nesse processo e que não foram contempladas em nossa pesquisa. Essas limitações não nos permitem saber tudo sobre o caso, cabendo ao investigador decidir até onde deve ir, qual o nível de profundidade do conhecimento a que pretende chegar, de forma a ser-lhe possível atingir os objetivos a que se propõe.

Esse tipo de metodologia, usada em nossa pesquisa, utiliza diferentes técnicas de coleta de informação e/ou de dados, tais como: a observação, a entrevista, a análise documental e os questionários. Utilizamos a análise documental, cuja descrição e modo de utilização serão apresentados no item a seguir.

³ Tradução nossa.

2.1.2 Documentos

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

Analizamos dois tipos de documentos: os didáticos (livros texto e artigos) e um oficial (Programa Nacional do Livro para o Ensino Médio – 2009). Os documentos didáticos foram divididos em primários e secundários. Os primários são os artigos originais (EINSTEIN, 1905; LENARD, 1906; MILLIKAN, 1916) que utilizamos na captação de informações mais próximas de suas origens ou da realidade vivida à época, enquanto que os secundários (MANGILI, 2012; NIAZ, et al, 2010; e outros) envolvem análise ou interpretações de informações baseadas em fontes originais. A maioria das fontes utilizadas em nossa pesquisa é secundária, de boa qualidade, levando em consideração apenas as informações que se relacionavam com o objeto e objetivo da pesquisa, dando-nos uma visão mais acurada ao nosso problema de pesquisa.

Para o documento oficial utilizado, consultamos o catálogo que norteia o Programa Nacional do Livro para o Ensino Médio (PNLEM, 2009), concebido pelo Ministério da Educação, por meio da Secretaria de Educação Básica (SEB), e em parceria com o Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), cujo objetivo é apresentar aos professores a estrutura dos livros didáticos, realizando uma análise crítica dos seus aspectos conceituais, metodológicos e éticos, além de fornecer algumas sugestões para a prática pedagógica.

Assim, o estudo desses documentos sob a perspectiva da temática de pesquisa, visa analisar a evolução histórica do efeito fotoelétrico apresentada por alguns livros didáticos de Física para o Ensino Médio, informando-nos de forma qualitativa se essa evolução histórica é adequada ou não. Caso essa seja considerada não adequada, buscaremos elencar esses entraves e incoerências.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo deste texto, tomado aqui como nossa primeira incursão na descrição histórica do efeito fotoelétrico, em bibliografias originais e secundárias, mostraremos o seu percurso evolutivo, a partir de Hertz, em 1886, até sua comprovação experimental, com Millikan, em 1916. Utilizamos como fonte de pesquisa alguns livros e artigos: (HERTZ, 1886 apud NIAZ; LENARD, 1906; EINSTEIN, 1905; MILLIKAN, 1916; SHAMOS, 1987; BASSALO, 1996; BASSALO, 2000; KRAGH, 1999; MANGILI, 2012) que nortearão essa descrição, ao tempo em que transmite uma maior segurança ao que pretendemos.

Este capítulo apresenta uma sequência didática, em forma de história, que contempla quatro episódios sobre a história do efeito fotoelétrico, necessários a sua compreensão: (a) A possível descoberta do efeito fotoelétrico por Hertz e sua caracterização; (b) As contribuições dadas por Phillip Lenard para este estudo; (c) Papel revolucionário de Einstein sobre o quantum de luz e sua explicação para o efeito fotoelétrico; (d) A verificação experimental do efeito fotoelétrico, realizada por Millikan.

3.1 Breve contextualização

No final do século XIX e início do século XX, a comunidade científica que se dedicavam ao estudo dos fenômenos eletromagnéticos procurava descrever a onda eletromagnética e compará-la com a luz, com isso, tentava também compreender a sua interação com o meio de propagação. A descoberta da relação existente entre a eletricidade e o magnetismo feita por Oersted⁴ em 1820⁵, forneceu importante contribuição para o aprofundamento nos estudos desse fenômeno, durante a década de 1830.

Posteriormente o escocês James Clark Maxwell⁶ (1831-1879) resumiu, em 1863, as relações entre os campos elétrico e magnético. Apresentando-se em quatro tipos de equações, demonstrando que os campos elétrico e magnético se propagavam à velocidade da luz, estabelecendo formalmente o conceito de ondas eletromagnéticas, tornando-se uma das descobertas mais importantes no campo da Física, uma vez que

⁴Hans Christian Ørsted. Físico e químico dinamarquês; mostrou que corrente elétrica (chamado na época de fluido elétrico) gera campo magnético.

⁵Esses resultados estão associados, também, a estudiosos como Faraday, Lenz, Ampère e muitos outros.

⁶James Clark Maxwell. Físico e matemático britânico. Conjecturou a união entre a eletricidade, o magnetismo e a óptica.

significou a unificação do Eletromagnetismo com a Óptica, duas áreas da Física que até aquele momento, eram consideradas completamente distintas, como nos colocam Bassalo, (1996) e Shamos, (1987).

As equações de Maxwell sugerem a existência de ondas eletromagnéticas, que se movimentam através de dielétricos⁷, baseado em grande parte, em cima das linhas de força de Faraday. Foi essa a sugestão que Hertz decidiu testar experimentalmente. 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. Hertz partiu dessas ideias de Maxwell, tentando verificá-las experimentalmente.

3.2 A possível descoberta do efeito fotoelétrico por Hertz e sua caracterização

Para explicar em que consistia o experimento e qual o aparato utilizado para sua realização, usamos como fonte de pesquisa as literaturas (SHAMOS, 1987; BASSALO, 1996; MANGILI, 2012), que nos abasteceram de informações importantes, dando-nos o insight necessário para a sua realização.

De acordo com Shamos (1987), em 1886, Heinrich Rudolf Hertz decidiu aceitar um desafio proposto pela Universidade de Berlim, que consistia justamente na comprovação experimental das equações de Maxwell. Com o apoio da Universidade de Karlsruhe, onde trabalhava, obteve uma boa condição laboratorial para desenvolver os experimentos. Nessa época, de acordo com Mangili (2012), ele dedicava-se tanto ao estudo da propagação da eletricidade através de meios, como também dos raios catódicos. Assim, acredita-se que Hertz já supunha ser possível a comparação entre descarga elétrica e a luz, não sendo exagero afirmar que ele já fazia certa relação entre as equações de Maxwell e Helmholtz⁸, que unificariam a eletricidade e o magnetismo.

Sua experiência foi realizada com osciladores, com os quais produziu radiação eletromagnética, que nos dias atuais, são intituladas micro-ondas ou onda Hertzianas. Com a utilização de bobinas associadas a uma bateria, Hertz conseguiu produzir centelhas provenientes das descargas elétricas, conseguindo manipulá-las. Desse modo,

⁷Isolante elétrico que, sob a atuação de um campo elétrico exterior acima do limite de sua rigidez dielétrica, permite o fluxo da corrente elétrica.

⁸ Hermann Helmholtz, físico alemão, escreveu sobre assuntos diversos desde a idade da Terra até a formação do sistema solar.

ele estudou seu comportamento em variadas situações, na tentativa de comprovar experimentalmente a teoria de Maxwell.

Esses osciladores eram constituídos por duas esferas metálicas, de aproximadamente 2 cm de raio, cada uma destas esferas possuía uma haste, e em sua extremidade, continha outra esfera metálica, entretanto, em tamanho menor; ambas as hastes estavam ligadas por uma bobina de Rühmkorff⁹. Ao alimentar essa bobina com um circuito elétrico, oscilante, ele observou centelhas entre as esferas metálicas, estas centelhas deveriam produzir uma radiação eletromagnética como havia sido preconizado por Maxwell em 1865.

O condutor primário era um corpo de latão cilíndrico, com 3 cm de diâmetro e 26 cm de comprimento. Era essencial que as superfícies polares fossem frequentemente polidas, e também que durante as experiências, fossem protegidas da iluminação produzida pelas descargas laterais simultâneas. A descarga é conduzida para as duas metades do condutor por meio de dois fios, que estão ligados perto da abertura de faísca em ambos os lados.

Para que esta radiação pudesse ser detectada, Hertz utilizou um ressoador¹⁰, constituído 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. O som e a aparência das faíscas indicavam se seu estado era satisfatório.

Movendo este dispositivo entre vários pontos do local onde ele realizava esta experiência, Hertz pôde calcular o comprimento de onda (este comprimento era a distância entre dois pontos onde a intensidade das faíscas era mais intensa)¹¹ da radiação eletromagnética, encontrando o valor de 66 cm. Hertz também observou que quando a esfera eletrizada negativamente era iluminada com luz ultravioleta, as

⁹Instrumento inventado por Henrich Ruhmkorff, em 1851. É 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.

¹¹ Cabe observar que as teorias elétricas existentes até então tratavam de sistemas estacionários ou estáticos.

centelhas surgiam mais facilmente. Mais tarde, este fenômeno ficou conhecido como efeito fotoelétrico.

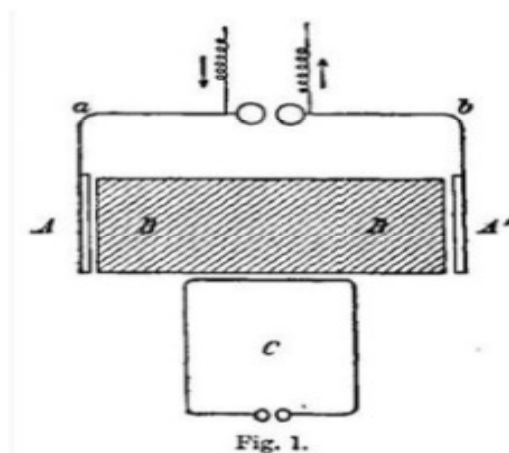


Figura 01: Circuito utilizado por Hertz para produzir sparks em circuitos distintos (MANGILLI, 2012, p. 41)

Hertz utiliza dois condutores, o primeiro é o que está representado na parte superior do aparato e o segundo condutor está representado abaixo (c), as letras (a) e (b) indicam o sentido da corrente; que entrava pela extremidade (a) do circuito e saía do sistema pela extremidade (b). Essas extremidades estavam conectadas a duas placas metálicas (A) e (A'), entre essas placas era introduzido um bloco (B), que era constituído de enxofre ou parafina. Hertz acreditava que ao realizar esse experimento, faíscas muito fortes apareceriam nesse circuito secundário e quando esse bloco (B) fosse retirado, haveria redução considerável nesse número de faíscas. Entretanto, isso não foi verificado durante o experimento.

Logo que conseguiu demonstrar a ação de uma oscilação elétrica se espalhando como uma onda no espaço, Hertz planejou experimentos que objetivavam concentrar a ação tornando-a perceptível a distâncias maiores, colocando o condutor primário na linha focal de um grande espelho parabólico côncavo. Esses experimentos não produziram os resultados desejados, e ele tinha certeza de que a falta de sucesso foi consequência da desproporção entre os comprimentos de ondas utilizados.

De acordo com Mangili (2012), o resultado esperado era que as centelhas produzidas sofressem alterações quando eram utilizados meios diferentes, mas percebeu também que a posição dos circuitos influenciava neste processo. Em seu experimento, ele observou que a faísca proveniente da superfície gerava uma segunda faísca nos

osciladores. Desse modo, Hertz construiu um aparato para evitar que essa segunda faísca fosse gerada, o que causou uma faísca secundária menos intensa. Ele constatou que isso era um fenômeno de natureza eletrostática¹² e que a luz ultravioleta era a responsável por tal fenômeno¹³. 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.

Em sua análise, Mangili (2012) supunha que Hertz buscava comparar estas centelhas com a luz, mas ele não faz afirmações sobre o caráter da onda eletromagnética gerada durante o experimento, além de não afirmar que o surgimento das centelhas e a luz eram o mesmo fenômeno, pois o seu interesse era descrever a onda eletromagnética e comprovar experimentalmente a teoria de Maxwell. 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 como é colocado na maioria dos livros didáticos? Vejamos então a seguinte colocação de Hertz (1886):

Logo que comecei os experimentos, eu fui afetado por uma notável e recíproca ação entre duas sparks¹⁴ 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 (1886), Apud MANGILI, 2012, p. 45).

Com base nessa citação, acreditamos ser conveniente afirmar que de fato Hertz não descobriu o efeito fotoelétrico como geralmente é colocado na maioria dos livros didáticos de Física. Essa nossa afirmação decorre do fato de que Hertz não se detêm a estudar o fenômeno verificado. Em outra citação, Hertz (1886) reforça que:

¹² De acordo com (SHAMOS, 1987), é conveniente destacar que na época, as teorias elétricas existentes não se aplicavam para sistemas variáveis. Até o momento, não havia preocupação com efeitos eletrostáticos em circuitos fechados e estes não eram estudados.

¹³ 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.

¹⁴ Centelhas/ faíscas emitidas durante o experimento (Tradução nossa).

Assim que eu soube que estava lidando com um efeito da luz ultravioleta, eu coloquei de lado essa investigação, para 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 Apud MANGILI, 2012, p.46).

Embora tenhamos consciência que ele de fato observou experimentalmente o fenômeno, acreditamos ser incoerente associar seu nome a essa descoberta. De acordo com Bassalo (1996), essa nomenclatura “efeito fotoelétrico” foi dada em março de 1888, por Righi¹⁵, que demonstrou que quando dois eletrodos são expostos a uma radiação ultravioleta, eles atuam como um par voltaico.

3.3 As contribuições dadas por Phillip Lenard para o estudo do efeito fotoelétrico

No artigo publicado em 1906 (LENARD, 1906), podemos constatar que o físico húngaro-alemão Philipp Eduard Von Lenard não demonstrava interesse em dar continuidade aos estudos de Hertz. Embora tenha sido seu assistente, ele estava mais interessado no estudo dos raios catódicos¹⁶, demonstrando interesse em estudar os tubos de Crookes¹⁷. Notadamente, não reproduziu fielmente as mesmas etapas seguidas por Crookes, achando ser mais conveniente fazer suas experiências isolando o fenômeno com o auxílio de fontes de interferência.

Ele acreditava ser interessante trazer os raios a partir do tubo de saída para o ar livre, pois seria possível realizar experimentos com eles. Para que isso fosse possível, era necessário encaixar na parede do tubo, uma vedação hermética que permitiria a passagem dos raios. O quartzo pareceu ser o material mais promissor, uma vez que transmitia as radiações da melhor forma. Lenard considerou que o teste foi bem sucedido, pois, exceto no quartzo, ele não encontrou nenhuma espécie de fosforescência.

¹⁵ Augusto Righi. Físico italiano.

¹⁶ Feixe de elétrons produzidos quando uma grande diferença de potencial é estabelecida entre dois eletrodos.

¹⁷ William Crookes. Químico e físico inglês. Os tubos de Crookes são tubos de vidro com ar rarefeito em seu interior;

Lenard realizou vários estudos relacionados aos raios catódicos; o primeiro ponto ao qual se deteve foi a permeabilidade. Com base em seus estudos sobre a espessura dos materiais, Lenard chegou a considerações muito importantes, que foi a relação carga/massa. Desse modo, Lenard busca nos levar a uma reflexão entre a lei da proporcionalidade, a absorção de raios catódicos e a composição da matéria; com isso seria possível ter um maior conhecimento sobre a natureza dos raios catódicos. Lenard chega à conclusão de que os raios não emitem moléculas eletricamente carregadas, mas simplesmente transmitem energia elétrica. De acordo com Klassen (2009b), no ano de 1905, Lenard recebeu o Prêmio Nobel por seu trabalho com raios catódicos e no ano seguinte, Thomson recebeu o prêmio por seu trabalho sobre o elétron.

O aparato experimental utilizado por Lenard

Para que tenhamos um maior conhecimento acerca do trabalho desenvolvido por Lenard, recorreremos a um artigo publicado por ele em 1906, no qual ele relata sobre o aparato experimental (figura 02) utilizado para o estudo do efeito fotoelétrico.

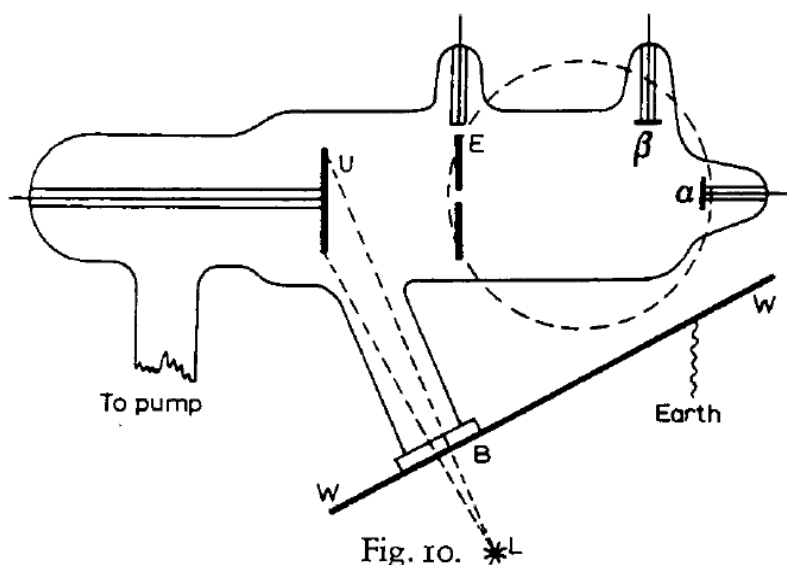


Figura 02: Aparato experimental utilizado por Lenard para o estudo do efeito fotoelétrico. (LENARD, 1906, p.122).

O aparato experimental era constituído de um tubo de vidro, mantido a uma baixa pressão, produzido pelo tubo lateral de vácuo (to pump). 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 anodo 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). Lenard, primeiramente investigou a relação existente entre a corrente que atingia o ânodo e a diferença de potencial aplicada ao eletrodo (U), percebendo que para valores maiores que 2V positivo, não havia passagem de corrente, ao passo que para valores menores que 2V positivo, uma corrente de baixa intensidade era observada. Assim, com esse experimento, Lenard concluiu que os elétrons não eram simplesmente liberados do cátodo, mas, ejetados com uma energia cinética, suficiente para vencer a barreira do potencial de frenamento¹⁸.

De acordo com a literatura (Lenard, 1902 Apud Niaz, 2010; Wheaton, 1983), a partir do ano de 1902, Lenard publicou as leis do efeito fotoelétrico, oriundas das experiências que haviam sido realizadas. Nesse artigo, ele supõe 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 possuíam certa velocidade, intitulada velocidade fotoelétrica, sendo essa equivalente ao potencial e a energia cinética. Com base nisso, ele coloca que a energia luminosa incidente sobre a superfície metálica deveria provocar a liberação apenas dos elétrons selecionados, não adicionando energia ao mesmo. 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.

De acordo com Klassen (2009b), Lenard começou a investigar a natureza do efeito fotoelétrico ainda mais profundamente e em 1902, descobriu, para sua surpresa, que apenas o número de elétrons emitidos era afetado pela intensidade da luz, mas nada

¹⁸ O potencial de frenamento ou frenagem, era a diferença de potencial dentro do fototubo que obriga o fotoelétron mais energético a parar.

acontecia com a energia. De modo ainda mais surpreendente, Lenard descobriu que a energia dos elétrons dependia do comprimento de onda da luz, assim, a luz que possuía comprimento de onda mais curto, ejetava elétrons mais rapidamente. No entanto, Lenard era incapaz de desenvolver condições experimentais adequadas que lhe permitisse quantificar o efeito fotoelétrico.

Basicamente, Lenard 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. Uma vez que a estrutura do átomo não era conhecida até aquele momento, sua explicação foi razoável, mesmo que não fosse muito detalhada.

Posteriormente, Lenard recebeu muitas críticas para sua hipótese, sendo que a mais severa era devido à desconsideração da influência da temperatura sobre o efeito fotoelétrico, como é posto por (NIAZ et al, 2010). Supondo-se que tendo o elétron uma determinada velocidade dentro do átomo, essa velocidade deveria ser aumentada caso houvesse o aumento de temperatura. No entanto, esse aumento de velocidade não foi identificado, nem mesmo durante a comprovação experimental por Millikan. Assim, todos aqueles que sugeriram essa relação, falharam.

De acordo com o Bassalo (2000), no ano de 1902, Philipp Lenard, apresentou nos anais de Física, Leipzig 8 (pag.149), as seguintes leis para efeito fotoelétrico:

- 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.

Essas leis eram incompatíveis com o eletromagnetismo clássico proposto por Maxwell, uma vez que, quanto mais intensa a radiação eletromagnética, maior seria a energia cinética dos fotoelétrons ejetados.

3.4 Papel revolucionário de Einstein sobre o quantum de luz e sua explicação para o efeito fotoelétrico

Como vimos anteriormente, até o início do século XX, o que se tinha como subsídio para explicar o efeito fotoelétrico eram duas leis empíricas que foram estabelecidas por Lenard:

- a) A energia máxima dos elétrons emitidos é proporcional à frequência da luz, e não à sua intensidade.
- b) A corrente fotoelétrica, ou número de elétrons emitidos por unidade de tempo, era proporcional à intensidade da luz incidente.

Em 1905, Einstein (EINSTEIN, 1905) elaborou seus postulados, buscando explicar de forma mais precisa o fenômeno em questão. Ele estabeleceu que a luz comportava-se como sendo constituída por um fluxo de unidades localizadas independentes, ou seja, partículas de energia, ao qual ele denominou de *quanta* de luz. Assim, essa concepção de que a energia da luz fosse distribuída uniformemente sobre o espaço através do qual ela propagava-se, encontrava grandes dificuldades na tentativa de explicação do efeito fotoelétrico. Ao assumir essa proposição, percebeu que tornaria as equações de Maxwell inválidas para esse contexto. Portanto, no sentido de compatibilizar-se com essa nova propositura, recorreu aos resultados teóricos descritos por Planck, evidenciando uma concepção radical para a visão clássica da época.

De acordo com Einstein (1905), a luz incidente é composta de quantum de energia, que é dado por: $\left(\frac{R}{N}\right)\beta\nu$ ¹⁹. Esse quanta de energia incide sobre uma superfície metálica, penetrando-a, cedendo-lhe sua respectiva energia para o elétron, sendo que uma parte dessa energia cedida deverá se transformar em energia cinética nos elétrons possivelmente ejetados. Em um processo mais simples é concebível que um quantum de luz forneça toda sua energia a um único elétron.

Assim, não se desconsidera a possibilidade de que o elétron originalmente no interior do corpo teria perdido partes de sua energia cinética. Além disso, pode-se supor ainda, que cada elétron realiza um trabalho P ao ser ejetado do corpo.

¹⁹ Esse trabalho de Einstein de 1905 é incompatível com a teoria de Planck, por esse motivo ele não utiliza a constante “h” de Planck, como é amplamente difundido nos dias atuais. Einstein recorre à lei de radiação do corpo negro de Wien para explicar o fenômeno, por isso, ele utiliza essas constantes. A ideia de quantização de energia de Einstein, da forma como é apresentada em seu trabalho de 1905, não pode de maneira alguma ser associadas à lei de Planck, uma vez, que mesmo se tratando de quantização de energia, Einstein recorre a argumentos clássicos, impossibilitando assim essa associação. O β utilizado é a constante que aparece no expoente da lei de Wien $e^{-\beta t}$.

$$\frac{R}{N}\beta\nu - P$$

Esses elétrons ejetados normalmente da superfície tinham maior velocidade. A sua energia cinética pode ser representada matematicamente como:

$$\pi e = \frac{R}{N}\beta\nu - P$$

onde e é a carga eletrônica, ou ainda pode ser representada como:

$$\pi E = R\beta\nu - P' \quad ^{20}$$

onde E é a carga de um grama equivalente do ion monovalente e P' o potencial desta quantidade de carga negativa em relação ao corpo.

Até o momento, Einstein não se mostra contrário às ideias de Lenard sobre o efeito em questão. Se cada quantum de luz cedia sua energia para um elétron especificamente, dizia-se que a quantidade de raios catódicos produzidos seria independente da intensidade da radiação, por outro lado, o número de elétrons deixando o corpo, sob condições iguais, seriam diretamente proporcional à intensidade da radiação incidente.

Entretanto, Einstein faz uma consideração importante, onde ele coloca que caso assumissemos que a energia dos quanta de luz incidente, era dada completamente a elétrons individuais, então a hipótese anterior não era plausível, e matematicamente, a equação anterior deveria apresentar a seguinte desigualdade:

$$\pi E + P' \leq R\beta\nu$$

²⁰ Einstein coloca que $N \times e = E$, desse modo, fazendo um rearranjo das equações, passando o N para o primeiro membro da equação, teremos essa multiplicação que resultará em E .

No processo inverso teríamos:

$$\pi E + P' \geq R\beta v$$

Einstein faz considerações sobre essas desigualdades no intuito de mostrar que πE devia sempre ser consideravelmente maior do $R\beta v$, uma vez que assumimos que na ionização de um elétron por luz ultravioleta, cada quantum de luz é utilizado para remover apenas 1 elétron. Assim, o trabalho necessário para a ionização da partícula não pode ser maior do que a energia do quantum absorvido.

É importante ressaltar que Einstein não se refere ao fenômeno como efeito fotoelétrico e que o termo utilizado por ele para descrever o que hoje denominamos fóton era "quantum de luz", sendo que posteriormente em 1926, o termo fóton foi introduzido pelo químico Gilbert Lewis, como nos revela Klassen (2009). No mesmo artigo, Klassen (2009) afirma que em um curso de nível introdutório, para o caso do efeito fotoelétrico, por exemplo, deve-se considerar o quantum de luz, evitando-se uma associação ao conceito de partícula de luz (fóton), uma vez que tal partícula leva a concepção de localização e movimento entre o emissor e o detector de luz. O que deve ser enfatizado é a natureza mecânica da interação do quantum de luz com a matéria.

3.5 A verificação experimental do efeito fotoelétrico, realizada por Millikan.

Como já vimos anteriormente, Einstein propôs uma teoria baseada em fundamentos quânticos que de forma revolucionária explicava o efeito fotoelétrico. De acordo com Millikan (1916), foi em 1905 que Einstein fez o primeiro acoplamento de efeitos relacionados à luz com alguns aspectos da teoria quântica, o que para Millikan foi uma antecipação ousada, para não dizer imprudente. Millikan ainda comenta que, mesmo com o aparente sucesso da equação desenvolvida por Einstein, a teoria física envolvida era tão insustentável que o próprio Einstein, já não se deteria a ela.

De acordo com Niaz et al (2010), Millikan faz algumas considerações a cerca da validade da equação fotoelétrica de Einstein e a tão questionada hipótese do quantum de luz. Partindo das ideias apresentadas em Einstein (1905), podemos ressaltar 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. No entanto, Millikan (1916) contesta essa hipótese, uma vez que essa parece exigir alguma modificação da teoria clássica. Assim, a energia cinética máxima de emissão de corpúsculos sob a influência da luz seria dada pela equação:

$$\frac{1}{2}mv^2 = V \cdot e = h\nu - p \quad (I)$$

onde $h\nu$ seria a energia absorvida pelo elétron, p o trabalho necessário para “arrancar” o elétron do metal e $\frac{1}{2}mv^2$ era a energia com que o elétron deixava a superfície. Essa energia era medida pelo produto da sua carga e pelo P.D²¹. Nesta época, não havia nenhum experimento disponível que permitisse conhecer o comportamento e as características mais relevantes sobre o PD, por esse motivo, nessa época nada se sabia sobre esse potencial.

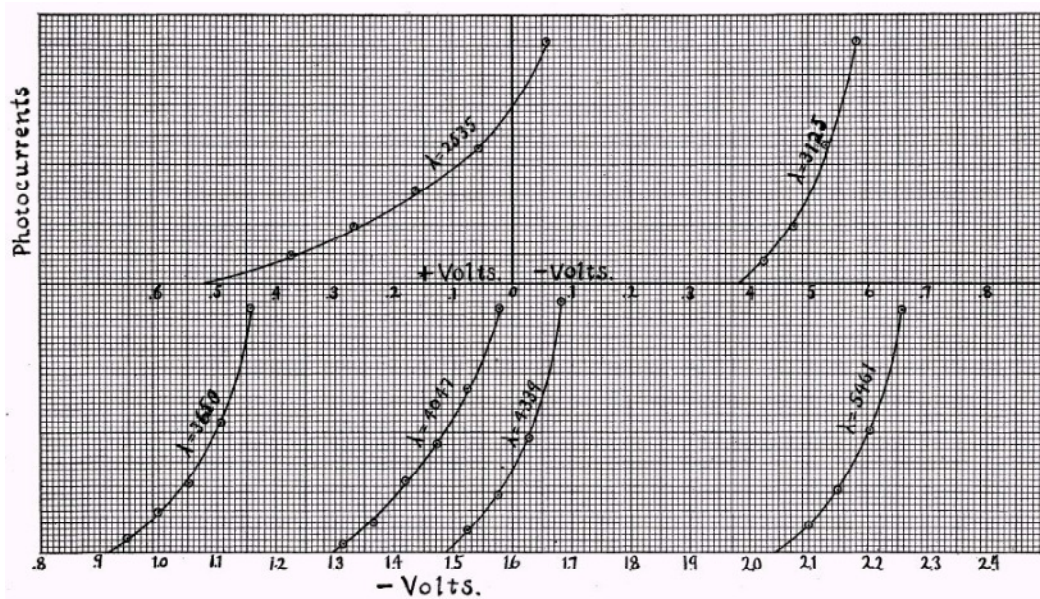
Millikan (1916) aponta algumas hipóteses que poderia ser verificada experimentalmente com base na equação (I):

²¹ O PD era a diferença de potencial dentro do fototubo que obriga o fotoelétron mais energético a parar. (Potencial de frenagem)

1. Que para cada frequência ν , existe certo valor crítico, determinando uma velocidade máxima de emissão de corpúsculos²².
2. Que existe uma relação linear entre o potencial (V) e a frequência (ν).
3. Essa $\frac{dV}{d\nu}$ ou a inclinação da linear do potencial (V) e a frequência (ν) é numericamente igual a h/e ²³.
4. Essa frequência crítica ν_0 onde a velocidade é nula ($v = 0$), e o trabalho ($p = h\nu_0$), intercepta a linha do gráfico de $V \times \nu$ no eixo ν . Essa é a menor frequência com que o metal em questão pode ser fotoeletricamente ativado.
5. Que a força eletromotriz de contato entre quaisquer dois condutores é dada por esta equação: $fem = h/e (\nu_0 - \nu_0') - (V_0 - V_0')$.

Ele ressalta que apenas a primeira hipótese acima citada havia sido testada. Durante os dez anos que se passaram, desde que Einstein montou sua equação, a quinta das afirmações acima nunca foi testada em sua totalidade, enquanto a terceira e a quarta nunca foram submetidas a teste experimental cuidadoso, que pudesse permitir uma resposta exata.

Então, partindo da incredulidade de Millikan frente à teoria estabelecida por Einstein, ele decide verificá-la de forma experimental. Como resultado desses testes experimentais, Millikan obteve importantes resultados, conforme observamos nos gráficos mostrados nas Figuras 03 e 04:



²² Millikan utiliza a palavra corpúsculos para se referir aos elétrons.

²³ Relação carga massa.

Figura 03. Conjunto de curvas de fotocorrente em função do potencial. (MILLIKAN, 1916. P. 371)

De acordo com a Figura 03, podemos visualizar a relação entre a fotocorrente e o potencial, e verificamos que todas as curvas exceto aquela cujo comprimento é $\lambda = 2,535\text{cm}$, atinge o potencial no lado da voltagem negativa, o que significa que o potencial do sódio sendo positivo em relação ao cobre, age de forma a retardar esse potencial, como nos explica Millikan (1916). Já o resultado de se traçar as intercepções no eixo potencial em relação à frequência, é dado pela Figura 04 que nos mostra que existe exatidão na relação entre o P.D. e a frequência ν .

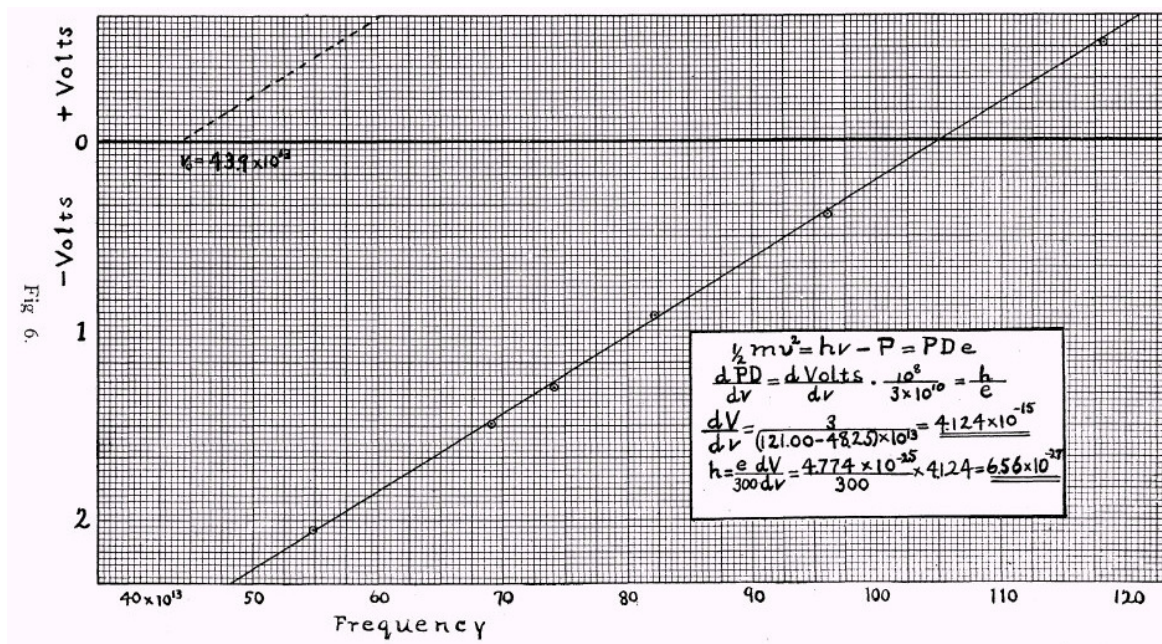


Figura 04. Relação entre o potencial e a frequência. (MILLIKAN, 1916. P. 373)

Os Experimentos realizados por Millikan revelam que a 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, portanto, a teoria eletromagnética de Maxwell não poderia ser aplicada para essa situação. Outro fato que não podia ser explicado classicamente era a relação entre o potencial e a frequência da radiação incidente. Quando ele mediu as energias dos elétrons ejetados, a partir de vários metais por diferentes frequências de luz, Millikan verificou que, para cada metal havia uma função trabalho (P), entretanto, a constante $\left(\frac{R}{N}\right)\beta\nu$ tinha o mesmo valor.

Após esses experimentos, Millikan (MILLIKAN 1916) admite que talvez ainda seja muito cedo para se afirmar com absoluta confiança a validade geral e exata da equação de Einstein. No entanto, deve-se admitir que as experiências atuais constituíam-se na melhor justificativa para tal afirmação, e essa equação tendo validade geral, deveria ser considerada como um das equações mais fundamentais.

No ano de 1924, Millikan (MILLIKAN, 1924) confirma 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)²⁴.

Assim, concluímos com essa breve explanação acerca das contribuições de Millikan, que sua tentativa de estabelecer a forma matemática da relação entre a energia do elétron ejetado, a energia incidente equivale a frequência, teve grande êxito, permitindo a comprovação experimental da teoria de Einstein. Entretanto, Millikan não aceitou a proposta de Einstein, o que ele confirmou refere-se apenas às equações, não à teoria.

²⁴ (Tradução nossa)

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS LIVROS DIDÁTICOS

Nesta pesquisa, buscamos avaliar como os livros didáticos de Física mais utilizados no Ensino Médio apresentam as questões relacionadas à evolução histórica referente ao efeito fotoelétrico. Dentre os livros citados na TABELA 01, quatro deles (em negrito) são referenciados pelo PNLEM (2009). Vejamos:

Código do livro	Título	Autor(es)/Ano	Volume analisado	Editora
Livro 1	<u>Física em contextos</u>	Maurício Pietrocola [et.al.] / 2010	Volume 3	FTD
Livro 2	<u>Física ciência e tecnologia</u>	Penteado e Torres / 2005	Volume 3	Moderna
Livro 3	<u>Física Série Brasil</u>	Alberto Gaspar / 2004	Volume único	Ática
Livro 4	Conexões com a Física	Sant´anna [et.al] / 2010	Volume 3	Moderna
Livro 5	Os fundamentos da Física	Ramalho, Nicolau e Toledo / 2004	Volume 3	Moderna
Livro 6	Temas de física	Bonjorno / 1997	Volume 3	FTD
Livro 7	<u>Física</u>	Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga 2002	Volume 3	Scipione
Livro 8	Física moderna: Tópicos para o ensino médio	Dulcideo Braz / 2002	Volume único	Companhia da Escola

Tabela 01: Livros analisados

Nesse capítulo, nos utilizamos da análise de conteúdo como principal ferramenta de pesquisa. Buscamos verificar como os autores das obras em questão exploram e explicam a construção dos conceitos físicos desenvolvidos, referentes ao efeito fotoelétrico, como um processo de produção cultural do conhecimento, evitando resumir a biografias de cientistas ou a descobertas isoladas. Esta análise tomará como base alguns critérios sinalizados por NIAZ et al. (2010), que servirão para nortear nossa pesquisa. Dentre os critérios estabelecidos para a nossa análise, citamos:

- 1) De acordo com nossa fundamentação teórica (SHAMOS, 1987; BASSALO, 1996; MANGILI, 2012), verificamos que existe incoerência ao afirmar que teria sido Hertz o descobridor do efeito fotoelétrico. Embora ele tenha verificado o efeito experimentalmente, ele não se dedicou a esse estudo, portanto, não há coerência atribuir a ele essa descoberta. A partir dessas informações, buscamos verificar como esse episódio histórico é colocado nos livros didáticos do Ensino Médio;

- 2) Lenard forneceu importantes contribuições para a elucidação do efeito fotoelétrico ao determinar experimentalmente que a velocidade dos elétrons ejetados independe da intensidade da luz. Segundo Niaz et al (2010), essa teria sido sua maior contribuição, que ficou conhecida como a hipótese do gatilho de Lenard. Com base nessas informações, acreditamos ser conveniente que os livros didáticos apresentem as seguintes sugestões, relatando sobre:
 - A posição de Lenard frente à teoria ondulatória da luz;
 - A velocidade dos elétrons ejetados ser independente da intensidade da luz;

3. Einstein (1905) deu contribuições significativas para concretizar a teoria sobre o efeito fotoelétrico. Utilizando a hipótese quântica, ele conseguiu explicar de forma simples e bastante coerente o fenômeno em questão. Verificamos como as contribuições de Einstein para o efeito fotoelétrico são apresentadas nos livros analisados, tomando os seguintes aspectos como referencial:
 - A ejeção de elétrons depende da frequência da luz incidente;
 - A luz é constituída por quanta localizados;
 - A objeção à hipótese Einstein;
 - A comprovação experimental realizada por Millikan.

É importante ressaltar que estamos elencando apenas alguns tópicos para verificação. Tendo em vista a infinidade de possibilidades que poderiam ser abordadas, é perceptível

a necessidade de limitar nossa pesquisa, nortendo-nos para um estudo mais específico. Muitas teorias e muitos experimentos foram realizados para elucidação do efeito fotoelétrico, entretanto não seria viável abordar aqui todos esses episódios.

4.1 Da avaliação dos livros didáticos

Livro 1

Esse livro apresenta dois capítulos dedicados à física quântica, desse modo, ele cita uma breve contextualização acerca de fenômenos luminosos e das ondas eletromagnéticas. A introdução apresentada no livro nos permite ter uma ideia geral sobre os fenômenos quânticos.

De acordo com o primeiro critério estabelecido, o livro apresenta o contexto histórico de forma satisfatória, uma vez que cita as contribuições dadas por Hertz ao fenômeno, sem atribuir a ele essa descoberta. Também é mencionado o fato de Hertz ter realizado o experimento no intuito de verificar e comprovar as equações estabelecidas por Maxwell. Notadamente, o livro faz um breve relato do experimento, citando que Hertz observou a existência de faíscas que emanavam do aparato elétrico (eletrodo), entretanto, não faz menções sobre o aparato experimental utilizado e nem discute o estranho fenômeno que observou. Em seguida, apresenta alguns aspectos para o fenômeno, estabelecido por Lenard:

- I) Para uma frequência fixa de luz incidente, observou-se que não importa quão intensa é a radiação incidente, a energia cinética dos elétrons é sempre a mesma (p.376);
- II) Se a radiação incidente (luz) tem uma frequência muito baixa, nenhum elétron é emitido, independente da intensidade da radiação. Para frequências acima desse valor mínimo, a energia cinética dos elétrons emitidos é proporcional à frequência da luz (p.376).

Desse modo, o livro 1 apresenta-se coerente com as leis empiricamente estabelecidas por Lenard e publicadas no ano de 1902. Ao longo do texto, encontramos alguns relatos que estabelecem as posições contrárias de Lenard frente à teoria ondulatória da luz. É feita uma relação entre a velocidade dos elétrons ejetados e a intensidade da luz (Luz essa que provocaria a liberação dos elétrons selecionados). No decorrer do texto não é

utilizado o termo de hipótese do gatilho, também, não parece ser o intuito do autor fazer uma descrição precisa das hipóteses estabelecidas por Lenard. No entanto, o autor detêm-se a fazer uma análise criteriosa e comparativa entre essas novas hipóteses quânticas para a luz e a teoria clássica que a envolvia.

O livro cita um arranjo experimental simplório, que tem como objetivo mostrar como o fenômeno acontece, além de discutir assuntos como a energia dos elétrons, a frequência de corte e o potencial de corte. Além disso, o livro ainda traz uma parte que aborda aplicações práticas do efeito fotoelétrico no dia a dia.

Posteriormente, são apresentadas as explicações para o efeito sob o ponto de vista de Einstein, onde é colocada a determinação de que a radiação eletromagnética é constituída por pacotes de energia, entretanto, não mostra porque utiliza a carga quantizada, nem aponta o fato de que Einstein colocou que a velocidade dos elétrons ejetados dependia da frequência e não da intensidade da luz incidente. Nesse contexto, relata que “(...) cada processo de ejeção ocorre por causa de algum evento microscópico em que o elétron absorve um fóton e depois deixa a superfície (...)” (Pietrolola, 2010 p.380). É sabido que o termo fóton, como é utilizado atualmente, só foi introduzido mais tarde, no ano de 1926 por Gilbert Lewis. As demais explicações decorrem da equação: $E = h\nu - \phi$, que com base no original de Einstein (EINSTEIN, 1905), é incoerente, uma vez que Einstein não estabeleceu essa relação. Originalmente, Einstein não utilizou a constante de Planck de forma explícita como pode ser observado na fundamentação teórica desse trabalho. Por fim, é mostrado que este fenômeno teve sua comprovação experimental por meio de medições cuidadosas no ano de 1916, por Milikan.

É interessante ressaltar que o livro em questão não aponta nenhuma dificuldade enfrentada por Einstein para o estabelecimento dessa nova teoria. Também não é mencionada a incredulidade de grande parte da comunidade de físicos da época, principalmente Millikan que estava determinado a provar o erro da teoria de Einstein.

Livro 2

O livro em questão comenta sobre as primeiras evidências da emissão de elétrons oriundos de placas metálicas, quando absorvem uma quantidade discreta de luz, discute sobre a sua verificação experimental, no entanto, não faz nenhuma menção ao

experimento. Comenta também que as primeiras evidências foram identificadas por Hertz, embora não aponte como essas foram verificadas. Há a tentativa de reproduzir um experimento para explicar tal fenômeno, entretanto, recorre-se a aparatos tecnológicos atuais como eletrodos e amperímetros. Quanto a Einstein, o autor coloca que sua teoria é uma extensão da teoria de Planck e que a “luz e as radiações eletromagnéticas seriam um feixe de pacotes de energia ao qual ele chamava de fótons” (p.211). O livro cita também, o fato de que cada fóton cede toda sua energia a um único elétron. O restante da explicação gira em torno da equação $E = h\nu - \phi$ e em alguns trechos reforça a visão de cientista genial.

Na realidade, o livro apresenta todas as informações de forma muito breve e algumas vezes imprecisa. De fato, a teoria de Einstein teve sua base na teoria de Planck, no entanto, isso não é citado de forma completa no texto, ou seja, não são apresentados os motivos que levaram Einstein a optar por essa teoria. E quanto à terminologia “fótons”, a literatura (Klassen, 2009b) nos aponta que a mesma só foi utilizada a partir de 1926.

Não são apresentadas as contribuições dadas por Phillip Lenard. Não apresenta os motivos que levaram Einstein a estabelecer essa nova teoria, nem as dificuldades por ele enfrentadas, bem como a comprovação experimental do fenômeno. O contexto histórico é superficial e frágil, apesar da análise do PNLEM (2009) apontar que o livro descreve esse contexto de forma satisfatória em diversos pontos da obra, em que informações corretas são apresentadas em relação a épocas, fatos e personagens históricos.

Posteriormente, o autor termina suas explicações, usando argumentos clássicos para explicar este fenômeno quântico. Seguramente, a literatura (BARROS, 2012) tem nos mostrado que as dificuldades apresentadas pelos estudantes apontam fortemente para uma falsa analogia entre a Física clássica e a quântica, denotando que esses alunos possuem ideias clássicas arraigadas em sua estrutura conceitual, usando-as inadequadamente para entender estruturas quânticas, gerando assim obstáculos epistemológicos.

Livro 3

O livro começa fazendo uma explanação geral em torno da evolução da teoria quântica. Nesse contexto, aponta que Hertz teria dado grandes contribuições para a descoberta do

efeito fotoelétrico, a partir da necessidade de comprovação da teoria de Maxwell. O autor nos coloca que “Pesquisando o fenômeno, Hertz concluiu que ele se devia a alguma forma de interação das radiações ultravioleta emitidas pelas faíscas do transmissor com a superfície do detector” (p. 525).

De acordo com a literatura (MANGILI, 2012), podemos verificar que a informação acima é inconsistente, uma vez que Hertz não se deteve ao estudo do efeito fotoelétrico, ignorando aquela situação nova e também por não fazer parte de seu objeto de estudo. No livro também não é descrito o aparato experimental utilizado por ele.

O livro apresenta a posição de Lenard a favor da teoria ondulatória, além de apresentar de forma coerente e detalhada as leis que foram empiricamente desenvolvidas por ele em 1902. Posteriormente, o autor faz uma comparação entre as teorias clássica e quântica e aponta que a partir dessas incongruências, surgiram os impasses entre a teoria ondulatória e a teoria corpuscular da luz. Acrescenta ainda que, a solução para esse impasse surge em 1905 quando Einstein utiliza a teoria corpuscular para explicar o fenômeno do efeito fotoelétrico. A teoria apresentada por Einstein aparece no livro de forma coerente, associada às equações sugeridas por Millikan. No entanto, não há relatos sobre os problemas para aceitação dessa teoria e sua comprovação experimental, em 1916, por Millikan.

Segundo o guia do PNLEM (2009), a História da Física é abordada em poucos momentos ao longo da obra, por meio de caixas de texto. Nesses momentos, a forma de apresentação é adequada, mas sucinta e sem elementos de problematização.

Livro 4

O livro apresenta uma breve contextualização histórica sobre o efeito fotoelétrico, tomando como base as explicações dadas por Einstein; o autor cita apenas a hipótese dos quanta de Einstein e comenta que o termo fóton foi usado a partir de 1926. O texto detém-se basicamente a apresentar as equações para explicar o efeito fotoelétrico, exagerando matematicamente nessa descrição, uma vez que só apresenta exercícios resolvidos sobre como calcular a energia da luz incidente, a frequência de corte e a função trabalho. No entanto, no que diz respeito à construção do conhecimento científico, a obra não trata da evolução histórica que sucede todo o desenvolvimento do fenômeno em questão.

Livro 5

Inicialmente, o livro em questão relata que o fenômeno foi descoberto por Hertz em 1887. Como sabemos essa não é uma afirmação coerente. Além disso, o livro não apresenta nenhuma menção a Lenard, partindo diretamente para a teoria desenvolvida por Einstein em 1905. A hipótese da quantização de energia é abordada, entretanto, essa explicação não apresenta muitos detalhes, resumindo-se a uma breve menção ao fato. Coloca também que quando o quantum de energia incide sobre a superfície, consegue liberar um único elétron.

De uma maneira geral, o livro apresenta uma definição do efeito fotoelétrico que pode ser considerada de boa qualidade, devida a precisão das informações e a forma clara com que as expõe. Apesar das suas breves informações históricas, elas são claras e precisas.

Não é feita nenhuma menção aos problemas que implicaram em Einstein escrever essa nova teoria, também não é citado nenhum problema enfrentado por Einstein ao tentar introduzir essa nova teoria. Como era de se esperar, também não há nenhuma menção a comprovação experimental realizada por Millikan.

Livro 6

O livro não faz nenhuma menção a Hertz, Lenard ou Millikan. Embora defina de forma precisa as leis empiricamente estabelecidas por Lenard, não menciona que aquela seria a hipótese do gatilho por ele definida. Da mesma forma, para o desenvolvimento conceitual do fenômeno e as hipóteses defendidas por Einstein, o livro em questão não o menciona, apesar de expor uma boa sequência conceitual. Na verdade, o livro apresenta uma boa definição para o fenômeno em questão, sem preocupar-se com o seu desenvolvimento histórico e seus respectivos formuladores. Percebemos também que o termo dualidade onda – partícula aparece no texto, sem que haja uma construção teórica satisfatória para isso.

Livro 7

Segundo o PNLEM (2009), a obra apresenta um tratamento conceitual contextualizado, relacionando os conhecimentos apresentados a situações do cotidiano e de aplicações tecnológicas. Leis, modelos e teorias físicas recebem tratamento conceitual adequado,

procurando equilibrar o formalismo matemático com uma linguagem clara, objetiva e atual. Por esses feitos, é um dos livros mais conceituados pelos professores do Ensino Médio. No entanto, no capítulo destinado a Física Moderna, o livro não faz nenhuma menção ao efeito fotoelétrico.

Em sua preocupação de apresentar o conhecimento científico de forma contextualizada, a obra utiliza inclusive elementos de História e Filosofia da Ciência em todos os capítulos, por intermédio de leituras específicas. No entanto, não encontramos nele nenhuma indicação para esse fenômeno, deixando-nos sem entender os reais motivos que levaram os autores a sua exclusão.

Livro 8

O livro apresenta o êxito de Hertz ao tentar comprovar experimentalmente as equações de Maxwell, inclusive não atribuindo a ele a descoberta do efeito fotoelétrico. O livro não faz menção ao aparato experimental utilizado por ele, mas descreve de forma satisfatória o seu desenvolvimento.

Por outro lado, o livro não apresenta as argumentações de Lenard frente à teoria ondulatória da luz. No entanto, apresenta um aparato experimental (modernizado) que busca representar como o fenômeno ocorre, descrevendo em seguida um satisfatório desenvolvimento conceitual, dentro do que Lenard havia previsto.

Os autores citam a dualidade onda-partícula, mostrando que a teoria ondulatória não poderia explicar o fenômeno em questão, uma vez que naquela situação deveria considerar a luz como pacotes de energia, ou seja, a luz era considerada partícula e não onda, como era suposto. As tentativas de explicar o efeito classicamente não teve o resultado desejado, portanto, Einstein estabeleceu uma teoria a fim de explicar o fenômeno de forma precisa.

O livro, na página 44, apresenta de forma compreensível as suposições de Einstein, mostrando que:

- D) Se a energia incidente é menor que a função trabalho, não haverá energia para liberação de elétrons e o fenômeno não ocorre.

- II) Se a energia é maior que a função trabalho, haverá energia suficiente para liberar elétron e ainda haverá energia excedente que será convertida em energia cinética.
- III) Se a energia for igual a função trabalho, haverá energia suficiente apenas para liberar o elétron.

Posteriormente, o autor faz uma referência ao experimento realizado por Millikan, na qual ele mediu diversos valores para a energia cinética e os analisou quantitativamente.

5. CONCLUSÃO

Quando tomamos como referência o catálogo de livros indicados pelo PNLEM (2009), procurávamos saber o que esse programa levava em consideração para torná-los utilizáveis, cumprindo o seu papel no processo ensino-aprendizagem. Dentre as várias características determinantes que descaracterizam esse processo, três nos chama a atenção. Vejamos:

- Formular erroneamente os conceitos que veicule;
- Fornecer informações básicas erradas e/ou desatualizadas;
- Mobilizar de forma inadequada esses conceitos e informações, levando o aluno a construir erroneamente conceitos e procedimentos.

Ao analisarmos o contexto histórico sugerido em nossa pesquisa e posto em alguns desses livros, podemos constatar que há uma inconsistência e superficialidade nos argumentos apresentados na maioria deles, levando-nos a verificar que essas características não foram obedecidas. O efeito fotoelétrico (quando abordado) na maioria dos casos apresenta-se de forma bastante resumida e está quase sempre caracterizado pela excessiva simplificação e falta de contexto, fornecendo informações inadequadas e desatualizadas. No entanto, esses resultados, segundo a literatura aqui apresentada, já eram esperados.

Na apresentação da evolução histórica do fenômeno, é mostrado um progresso que não acontece 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. Essas simplificadas informações, de certa forma, desvirtuam a natureza das descobertas científicas. Nesse sentido, qualificamos a simplificação como um dos maiores problemas na reconstrução desse fato histórico aqui conduzido.

Embora haja, em alguns livros didáticos aqui analisados, um estímulo explícito à leitura desse fenômeno e as informações apresentadas sejam corretas do ponto de vista histórico, esses aspectos são pouco explorados em função de um tratamento algumas vezes superficial. Nesse sentido, a literatura nos alerta que é da simplificação demasiada que resulta a história distorcida, fantasiosa e incompleta. Em outras palavras, não é conveniente apresentar os detalhes históricos em seções especiais, barras laterais dos livros ou tópicos que abordem algumas curiosidades, como observamos em alguns livros.

Acreditamos que tomar os critérios utilizados por Niaz et al (2010), na construção histórica desse fenômeno, levando em consideração principalmente as contribuições de Hertz, a hipótese do gatilho de Lenard, as dificuldades associadas com a hipótese de Einstein, as evidências experimentais de Millikan, constituem-se claramente em elementos importantes na evolução histórica do efeito fotoelétrico, não devendo ser tratadas como temas de menor importância, colocando-os como informações adicionais.

Com base nos livros didáticos analisados e na revisão de literatura, podemos perceber que existe um longo caminho a ser percorrido até termos livros mais eficientes. Bons materiais devem ser produzidos e chegar até os professores, que de certa forma, continuam usando esses livros como única fonte de pesquisa. Temos consciência de que nossa pesquisa não consegue abranger todos os pontos relevantes referentes ao efeito fotoelétrico e ainda existem muitas lacunas a serem preenchidas, todavia, ressaltamos que esse trabalho não é apresentado como uma pesquisa concluída e imutável, e esse aprofundamento é ponto ao qual nos deteremos em pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- BASSALO.J.M.F. **Nascimentos da física (1901-1950)** / Belém: EDUFPA.2000.
- BASSALO.J.M.F. **Nascimentos da física (3500 a.C.-1900 a.D.)** /Belém: EDUFPA.1996.
- BARROS, M.A. A mecânica quântica no processo de formação de licenciados em Física: Um estudo de caso. 170 folhas. Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em ensino, Filosofia e História das Ciências – UFBA, Salvador, BA, 2012.
- BONJORNO,C. **Temas de física 3**. Editora FTD. São Paulo, 1997.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio – Ciências da Natureza**. Brasília: Ministério da Educação, 1997.
- BRAZ. D.J; MARTINS. R.A. **Física moderna: Tópicos para o ensino médio**. Editora Companhia da escola, 1ª Edição. Campinas – São Paulo, 2002.
- EINSTEIN. **Annalen der Physik**, Vol.17. p.144, 1905.
- FÍSICA: **Catálogo do Programa Nacional de Livros para o Ensino Médio: PNLEM/2009/** Secretaria de Educação Básica, Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2008.
- FREIRE JR., et al. 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.
- GASPAR A. **Física Série Brasil**, 1ª Edição. Volume único. Editora Ática. São Paulo, 2004.
- GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- KLASSEN, S. The photoelectric effect: Reconstructing the story for the physics classroom. **Science & Education**, v.18, p. 593-607, 2009b.
- KRAGH H. **Quantum Generations: A history of Physics in the Twentieth Century**. Published by Princeton, New Jersey, 1999.
- 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.E.A.V. On cathode rays. **Nobel lecture**, may 28, 1906. p.105-134.

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, R. A. 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.

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

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.

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

PENTEADO P.C.M., TORRES C.M.A. **Física ciência e tecnologia**. Volume 3, 1° edição. Editora Moderna, São Paulo 2005.

PIETROCOLA M. et al, **Física em contextos**: Pessoal, social e histórico; eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria. -1° Edição- São Paulo: FTC, 2010.

RAMALHO J., NICOLAU G.F., TOLEDO P.A. **Os Fundamentos da Física -8° Edição**. rev. Ampl. – São Paulo: Moderna 2004.

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

SANT'ANNA, B. et al. **Conexões com a Física**. Volume 3, 1º Edição, Editora moderna 2010.

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

WHEATON, B. R. Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889 - 1911. **Historical Studies in the Physical Sciences**, 9, 199 - 322. (1978).

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

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

ARTIGOS CONSULTADOS

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

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

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

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