

Pesquisa bibliográfica em historicidade, conceitos e contextos na produção e transformação da luz com a teoria quântica

Mari Aurora Favero Reis
Agostinho Serrano de Andrade Neto

RESUMO

O estudo da luz, por muito tempo, foi fundamentado nos princípios clássicos da Física, que explica fenômenos ópticos como refração, reflexão, difração entre outros. Na Física Moderna o efeito fotoelétrico é estudado dentro da perspectiva da luz como sendo “quantum de luz” de Albert Einstein ou “fótons”, responsável por explorar aplicações tecnológicas. Esta pesquisa bibliográfica foi realizada com o objetivo de compor o estado da arte sobre a historicidade, conceito e contexto em pesquisas sobre o efeito fotoelétrico na produção e transformação da luz, bem como, usar recursos didáticos e tecnológicos utilizados no ensino de Física, na construção de conhecimentos pertinentes ao tema. Para a realização do estudo, os *papers* obtidos em sítios de busca foram agrupados em categorias, de modo a responder a seguinte pergunta: como as pesquisas para ensino de Ciências têm associado historicidade, construção de conceito e contexto ao tratar da produção e transformação da luz em efeito fotoelétrico? Os resultados demonstraram que as pesquisas mais importantes, nos aspectos didáticos em efeito fotoelétrico, numa linha do tempo, ocorreram de 2005 (Ano Mundial da Física) a 2015 (Ano Internacional da Luz), quando eventos históricos celebravam o centenário das publicações revolucionárias de Albert Einstein. Concluiu-se que a celebração de eventos históricos da Ciência pode engajar educadores e investigadores da área para pesquisar dificuldades de aprendizagens e gerar uma heurística positiva de avanços em pesquisas didáticas específicas. Quanto à possibilidade de relacionar historicidade, conceito e contexto em efeito fotoelétrico ou no estudo da natureza quântica da luz, o estudo demonstrou a necessidade de investigação prática e didática, podendo relacionar o tema com o uso de tecnologia fotovoltaica como situação do contexto.

Palavras-chave: Efeito Fotoelétrico. Quantum de Luz. Historicidade. Construção de Conceito. Tecnologia Fotovoltaicas em Ensino de Física.

Mari Aurora Favero Reis é Doutoranda pelo Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática (ULBRA). Atualmente, é professora de física na Universidade do Contestado.
E-mail: mariaurorafavero@gmail.com

Agostinho Serrano de Andrade Neto é Doutor em Física pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente, é professor do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Luterana do Brasil (PPGECIM – ULBRA). Canoas/RS. Endereço para correspondência: Av. Farroupilha, 8001 – Prédio 14 – Sala 318. Bairro São José, 92425-900 – Canoas/RS. E-mail: asandraden@gmail.com
Recebido para publicação em 6/4/2017. Aceito, após revisão, em 1/6/2017.

Acta Scientiae	Canoas	v.19	n.3	p.493-516	maio/jun. 2017
----------------	--------	------	-----	-----------	----------------

Bibliographic research on historicity, concepts and contexts in the production and transformation of light quantum theory

ABSTRACT

The study of light, for a long time, was based on the classical principles of physics, which explains optical phenomena such as refraction, reflection, diffraction and others. In Modern Physics the photoelectric effect is studied from the perspective of light as being “light quantum” of Albert Einstein or “photons”, responsible for exploiting technological applications. This bibliographical research was carried out with the objective of composing the state of the art on the historicity, concept and context in researches on the photoelectric effect in the production and transformation of light, as well as using didactic and technological resources used in the teaching of Physics, in the construction Knowledge relevant to the topic. In order to carry out the study, the papers obtained in search sites were grouped into categories, for order to answer the following question: how do researches for teaching science have historicity associated, concept construction and context when dealing with the production and transformation of light In photoelectric effect? The results showed that the most important researches, in didactic aspects in photoelectric effect, in a timeline, occurred from 2005 (World Year of Physics) to 2015 (International Year of Light), when historical events celebrated the centennial of revolutionary publications Albert Einstein. It was concluded that the celebration of science historical events can engage educators and researchers in the area to research learning difficulties and generate a positive heuristic of advances in specific didactic research. Regarding the possibility of relating historicity, concept and context in a photoelectric effect or in the study of the quantum nature of light, the study demonstrated the need for practical and didactic research, being able to relate the theme to the use of photovoltaic technology as a context situation.

Keywords: Photoelectric Effect. Quantum of Light. Historicity. Concept construction. Photovoltaic Technology in Physics Teaching.

INTRODUÇÃO

O estudo da luz, por muito tempo, foi fundamentado nos princípios clássicos da Física. Por volta da segunda metade do século XIX, a luz foi considerada uma onda que se propaga em determinado meio, com propriedades eletromagnéticas como: difração, interferência e polarização. Tais propriedades convenceram os físicos da época de que a luz monocromática visível é uma oscilação transversal periódica (NIAZ et al., 2010). O modelo explica perfeitamente parte dos fenômenos ópticos, porém é falho quando se trata, por exemplo, da natureza da luz ou do efeito fotoelétrico. O modelo atual sobre a natureza da luz tem a sua origem na Física Quântica (DAVIDOVICH, 2015). Os estudos literários em efeito fotoelétrico (KLASSEN, 2011; KLASSEN et al., 2012; NIAZ et al., 2010) apontam para os conceitos quânticos da luz a partir de uma visão da História da Ciência, fundamentada no *quantum* de energia.

Em 2015 iniciávamos a busca por publicações que tratam do efeito fotoelétrico para o ensino de Física, a partir do contexto produção e transformação da luz, uma vez que, 2015 foi eleito o Ano Internacional da Luz (AIL), proclamado pela 68ª Assembleia Geral das Nações Unidas em comemoração aos 110 anos da publicação do artigo de Albert Einstein sobre o efeito fotoelétrico (MOURA et al., 2015). O ano de 1905 foi mundialmente conhecido como *Annus Mirabilis de Einstein*, em que Albert Einstein

escreveu cinco trabalhos surpreendentes, entre eles, o artigo que descrevia o conceito fundamental do quantum de luz (ESHACH, 2009). No artigo publicado em 1905, “Albert Einstein introduz a quantização da radiação eletromagnética, o que permite explicar características *sutis* do efeito fotoelétrico: elétrons são ejetados do metal quando um feixe de luz incide sobre ele” (DAVIDOVICH, 2015).

O efeito fotoelétrico é um conceito essencial e introdutório nos conteúdos de Física Quântica e em livros didáticos de Ensino Superior (KLASSEN, 2011). Niaz e colaboradores (2010), ao analisarem 103 livros didáticos de Física Universitária observaram que, apenas dois deles não apresentavam os conceitos e fenômenos relacionados ao efeito fotoelétrico. A representação histórica adequada pode motivar o estudante a explorar a Física com uma curiosidade saudável (SRIRAMAN, 2006). Além disso, abordagens de exemplares históricos muitas vezes acabam contribuindo para os aspectos técnicos e conceituais da Física na Educação, oferecendo um olhar mais aprofundado e crítico na resolução de problemas (KRAUGH, 1992). Para o autor, a relação entre ensino de Física e a história da Física é intrinsecamente problemática, pois as lições a serem aprendidas com a história são muitas vezes contraproducentes para o ensino de Ciência.

Na Introdução da Física Moderna o efeito fotoelétrico é citado nos livros didáticos na confirmação da existência do “*quantum* de luz”, ou “*fótons*”, comumente visto como a principal razão para a sua importância (KLASSEN, 2011). Segundo esse autor, o termo “*fóton*” foi inventado somente em 1926, pelo químico Gilbert Lewis, que apresentou uma teoria equivocada do “*quantum* de luz” de Albert Einstein e o termo foi adotado pela comunidade científica quando Compton (1927) começou a usá-lo. Especialmente nos cursos de Engenharia, o efeito fotoelétrico é componente curricular de especial relevância no ensino da Física Moderna, uma vez que possibilita explorar, com os acadêmicos, aplicações tecnológicas como o funcionamento de lâmpadas, sensores fotoelétricos, laser, diodos e uma variedade de aplicações e processos associados à emissão e à transformação da luz.

Neste artigo serão apresentados os resultados de uma revisão bibliográfica com o objetivo de compor o estado da arte sobre a historicidade, conceito e contexto em pesquisas sobre a produção e transformação da luz em efeito fotoelétrico, bem como, usar recursos didáticos e tecnológicos utilizados no ensino de Física na construção de conhecimentos pertinentes ao tema. A pesquisa será realizada a partir de estudos que a antecederam, associados ao efeito fotoelétrico para o ensino da Ciência, a fim de responder a seguinte pergunta: como as pesquisas para ensino de Ciências têm associado a historicidade, construção de conceito e contexto ao tratar da produção e transformação da luz em efeito fotoelétrico? Essa pergunta desdobrou-se nas seguintes perguntas auxiliares: (a) quais as dificuldades e/ou modelos foram observados em estudantes no aprendizado de conceitos referentes ao efeito fotoelétrico? (b) Quais são os recursos didáticos utilizados pelos professores na construção de conhecimentos acerca do efeito fotoelétrico? (c) Nesses recursos, qual tem sido a situação contexto, especialmente de aplicação nas engenharias, explorada nas pesquisas investigadas?

METODOLOGIA DA PESQUISA

Esta pesquisa bibliográfica consistiu, inicialmente, na utilização de sítios de busca, como ERIC (*Educational Resources Information Center*) e *Taylor & Francis online*, proporcionando entradas de títulos e resumos (em diferentes idiomas), utilizando termos vinculados ao “efeito fotoelétrico”, “natureza da luz”, “quântica”, “*quantum*” e outros que foram surgindo nas pesquisas encontradas. De posse dos títulos dos artigos, os documentos foram acessados por meio do portal de periódicos da CAPES, integralmente. Também se utilizou o portal SJR¹ (*SCImago Journal & Country Rank*), onde foi realizada nova busca em periódicos de maior ranking na área da Educação.

Foram encontrados, a partir das buscas, 73 (setenta e três) artigos em revistas nacionais e internacionais, como: *Science & Education*, *European Journal of Physics*, *Physics Education*, *American Journal of Physics*, *The Physics Teacher*, *International Journal of Science Education*, *Journal of Research on Science Teaching*, Revista Brasileira de Ensino de Física, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, entre outros disponíveis nos periódicos da CAPES, na área de ensino. Inicialmente, os resumos dos artigos encontrados foram lidos para uma primeira categorização, considerando-se como critério o vínculo com ensino e aprendizagem de Ciências.

O método utilizado foi a análise de conteúdo à semelhança do utilizado em análise documental (BARDIN, 2007). Inicialmente, através de uma “leitura flutuante”,² os artigos encontrados foram submetidos a uma pré-seleção, sendo separados em três categorias, como foi realizada em pesquisa anterior (RAMOS; SERRANO, 2013): i) historicidade; ii) construção de conceito de efeito fotoelétrico e iii) uso de materiais didáticos.

Na classificação dos artigos, para cada categoria foram utilizados alguns critérios, de modo a atender os objetivos da pesquisa. Para a categoria “historicidade” foram selecionados artigos que tratam da história da Ciência para o ensino do efeito fotoelétrico, a partir da teoria quântica da luz, fundamentada no “*quantum* de luz”. Os artigos classificados na categoria “construção de conceito” tratam das concepções e dificuldades apresentadas pelos estudantes, no ensino do efeito fotoelétrico. Na seleção dos artigos para essa categoria priorizou-se na, investigação aqui realizada, os que tratavam de pesquisas aplicadas ao ensino de Física em cursos de graduação.

E a categoria “uso de materiais didáticos para ensino do efeito fotoelétrico” foi dividida em duas subcategorias: uma para pesquisar o uso de atividades computacionais, a partir de uma concepção de ensino e aprendizagem do tema e outra que se refere ao uso de laboratório real ou atividades práticas experimentais no ensino de efeito fotoelétrico. Especialmente, nesta última classificação, foi constatado que muitas das pesquisas em efeito fotoelétrico, encontradas na busca, referiam-se às pesquisas de

¹ O portal é uma interface gráfica projetada para acessar a classificação de indicadores bibliográficos no banco de dados da SCImago Journal & Country.

² Termo utilizado por Bardin no contato inicial com os documentos. O autor utiliza o método empírico para tratamento qualitativo e quantitativo de material jornalístico, discursos políticos, cartas, publicidades, romances e relatórios oficiais.

experimentos aplicados à Ciência pura, com alta complexidade em aplicação no ensino ou tecnologicamente inviáveis para laboratórios didáticos de Física. Outras eram aplicadas à Biologia ou à Medicina no estudo das células ou dos seres vivos. Por conta disso, dos 73 (setenta e três) artigos localizados, foram destacados 32 (trinta e dois) para fazer parte desta pesquisa, objetivando o foco da investigação. Nas pesquisas relacionadas ao uso de laboratório didático no ensino de Ciências (na Física para as Engenharias), foram encontradas sete que tratam do “*quantum* de luz” ou “*fóton*”, sendo que seus respectivos autores utilizavam o uso de células solares fotovoltaicas em atividades experimentais, que definimos como situação contexto para essa pesquisa bibliográfica.

RESULTADOS DA BUSCA PARA HISTORICIDADE EM EFEITO FOTOELÉTRICO

Das pesquisas publicadas em periódicos, na área de ensino de Ciências, para a historicidade do efeito fotoelétrico, os artigos encontrados foram publicados na virada do século XXI. Até 1962, a teoria quântica foi apenas esporadicamente mencionada, normalmente de uma maneira deformada e qualquer apresentação da Mecânica Quântica sempre era escondida ou ensombrada sob o título de Física Nuclear (TAMPAKIS; SKORDOULIS, 2007). Segundo os autores, por conta disso, na Grécia a Mecânica Quântica surgiu em saltos e limites (não de modo linear ou cumulativo), limitada por princípios sociais e ideológicos.

Algumas das pesquisas encontradas na busca tratam da história do desenvolvimento de tecnologias utilizadas em atividades cotidianas, que têm sua funcionalidade nos princípios do efeito fotoelétrico, porém, sem uma abordagem da História da Ciência. Entre as tecnologias, pode-se destacar: raios-X (JENKIN, J. G. et al., 1978; JENKIN, J.; LECKEY; LIESEGANG, 1977), na Austrália; tecnologias LED (ALADOV et al., 2010), na Rússia.

O trabalho pioneiro, na História da Ciência no ensino do efeito fotoelétrico, foi encontrado na Dinamarca (KRAGH, 1992). O artigo investiga as concepções da História da Ciência para o efeito fotoelétrico, apresentadas nos livros didáticos de Física. O autor relata que concepções, “apresentadas de forma explícita ou implícita, pertencem ao que tem sido chamado de quase-história, uma história mítica especialmente preparada para a doutrinação de certos pontos de vista metodológicos e didáticos” (KRAGH, 1992; p.351). Na visão do autor, existe um conflito inerente nos objetivos da história das Ciências tradicionais na Educação, na maneira clara e lógica como esta deve apresentar o seu material. E, na versão de quase-história, acaba sendo distorcida ou oculta, a fim de demonstrar como a Ciência deveria ser conduzida. Num contexto educativo, conforme relata Kragh (1992), a história precisa ser incorporada sem que haja propósitos ideológicos ou viole o conhecimento do modo como realmente aconteceu, sendo inserida, com relatos confiáveis, na introdução de assuntos científicos concretos. No caso do efeito fotoelétrico “é tecnicamente simples e fácil documentar, com fontes primárias, os fatos ocorridos de 1900 a 1920” (KRAGH, 1992). No entanto, os livros didáticos, ao

introduzir os conceitos quânticos (radiação de corpo negro, efeito fotoelétrico, raios-X e espalhamento Compton), acabam referindo-se a uma série de fatos experimentais que foram descobertos no início do século XX. O problema didático na apresentação deles, conforme relata o autor, é que a história é vista como meio para demonstrar aos estudantes que “dar ênfase à Física na quantização de energia, e não na história da Física, é uma conclusão inevitável” (p.351).

Dois anos depois, na Alemanha, Walter Jung (1994) alerta para uma mudança de paradigma sobre o entendimento da Física Quântica. O autor afirma que para entender o conceito de fóton é primordial o uso da perspectiva quântica, sendo necessária, para a compreensão do estudante, a compreensão da natureza da mudança de paradigma através da história e filosofia da Ciência, bem como, a introdução do *quantum* por parte de Planck e as contribuições de Einstein (1905) sobre a natureza da luz. Jung afirma que o uso da historicidade, além de ser importante para a humanidade, quando bem explorada, pode auxiliar o estudante a relatar, socialmente, as mudanças ocorridas na Física do século XVIII para o século XX. Afirma, ainda, que é necessário que se façam esforços para encontrar abordagens didáticas referentes aos detalhes da Física, nos possíveis contextos de uso.

Oon e Subramaniam (2009), em Singapura, publicam sobre a história da luz da era Planck aos tempos modernos, em que apresentam a contribuição de Planck, Einstein e Broglie. Os autores desenvolvem a pesquisa para a incorporação de elementos da história da luz no ensino da Física, de modo a incentivar os estudantes universitários ao interesse pela Física. “A história pode ser usada para levar o público à percepção de humanização dos cientistas ou físicos, mudando a tendência de que para ser cientista é necessário ter nascido gênio ou com extraordinária inteligência” (OON; SUBRAMANIAM, 2009). Segundo os autores, os estudantes deveriam entender que os cientistas são tão humanos como qualquer outra pessoa e propensos a cometer erros, podendo, por meio de tal percepção, despertar o estudante para a carreira de físicos.

No mesmo ano, em Israel, Eshach (2009) utiliza o glamour e o brilho da história do Prêmio Nobel de Albert Einstein, recebido pela publicação do artigo intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico, relativo à produção e transformação da luz” (1905), como motivação para aprendizagem do tema científico em sala de aula. A intenção de Eshach é, a partir da história e filosofia da Ciência, relacionar história e Ciência no contexto social e temas centrais de Física moderna. Como na pesquisa anteriormente relatada, o propósito da estratégia, ao estimular a busca da Ciência, foi atrair e motivar os alunos do Ensino Médio e calouros universitários para temas científicos. Na mensagem deixada por Eshach (2009), o valor dado ao Prêmio Nobel de Einstein, no ensino de Física, é concebê-lo como apoio à inserção histórica da Ciência e como estratégia motivacional para a inserção da História da Ciência no ensino do efeito fotoelétrico para o ensino de Física.

Nos anos seguintes (2010 a 2012), no Canadá, por meio do Conselho de Ciências e Engenharia da Universidade de *Manitoba* e pesquisadores do Departamento de Física da Universidade de Winnipeg, com apoio financeiro da Fundação *Maurice Price*, um grupo de pesquisadores (NIAZ et al., 2010; KLASSEN, 2011; KLASSEN et al., 2012)

publicou estudos de inserção e reconstrução da história do efeito fotoelétrico para o ensino da Ciência.

Inicialmente, após estudos na análise de livros didáticos em química, Niaz e colaboradores (2010) realizam uma análise com 103 livros didáticos de Física Universitária, com os seguintes objetivos (NIAZ et al., 2010, p.905): (i) propor uma reconstrução histórica dos acontecimentos que culminaram na hipótese do *quanta* de luz, de Einstein, para explicar o efeito fotoelétrico e a consequente polêmica na comunidade científica; (ii) elaborar seis critérios, baseados na reconstrução histórica do efeito fotoelétrico, para a avaliação de livros didáticos de Física; (iii) avaliar livros didáticos de Física Geral de nível universitário, com base nos seis critérios estabelecidos no item anterior.³

Os resultados obtidos revelam que esses elementos históricos são amplamente ignorados ou distorcidos nos livros didáticos (NIAZ et al., 2010). Na avaliação dos pesquisadores, apenas três dos textos obtiveram uma pontuação satisfatória e nenhum excelente. Segundo os autores, é possível a inclusão dos aspectos históricos relacionados com efeito fotoelétrico nos livros didáticos de Física, podendo facilitar uma melhor compreensão da dinâmica no progresso científico. Os autores recomendam que as rerepresentações da reconstrução histórica deveriam ser parte integral na apresentação do efeito fotoelétrico nos livros didáticos. Deste modo, os conhecimentos históricos não devem ser apresentados em seções especiais ou barras laterais dos livros didáticos. A proposta dos autores é que a história da Física esteja dentro dos conhecimentos e atividades desenvolvidas nas aulas e não inserida como disciplina opcional ao ensino da Física.

No ano seguinte, também no Canadá, Klassen (2011) realiza uma pesquisa bibliográfica para uma reconstrução da história do efeito fotoelétrico, a partir dos resultados obtidos na pesquisa anterior, na abordagem histórica do tema na avaliação dos livros didáticos. O autor destaca que cinco episódios da história são importantes e necessários para uma imagem da reconstrução do modelo quântico da história do efeito fotoelétrico: (a) a descoberta do efeito fotoelétrico; (b) o experimento inicial para o efeito fotoelétrico; (c) artigo revolucionário de Einstein do *quantum* de luz e sua explicação para o efeito fotoelétrico, que lhe concedeu mais tarde o Prêmio Nobel, apesar da não aceitação da hipótese quântica de Einstein na comunidade científica; (d) a verificação experimental da equação fotoelétrica de Einstein por Millikan, apesar de não aceitar a hipótese de Einstein; (e) as medidas de Compton e sua explicação teórica, que produz a aceitação definitiva da hipótese de Einstein.

No ano seguinte, grupo formado pelos mesmos pesquisadores, utilizando os critérios adotados na análise dos livros didáticos, analisa uma amostra de 38 instruções de laboratório de Física sobre efeito fotoelétrico no ensino superior, publicadas eletronicamente (KLASSEN et al., 2012). O estudo, com a participação de Mansoor

³ (i) Hipótese de Lenard para explicar o lançamento no efeito fotoelétrico; (ii) Hipótese quântica de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico; (iii) Falta de aceitação da hipótese quântica de Einstein pela comunidade científica; (iv) Determinação experimental de Millikan para a equação fotoelétrica de Einstein e constante de Planck, h ; (v) Pressupostos de Millikan sobre a natureza da luz; (vi) Registro e apresentação histórica e sua interpretação dentro na perspectiva da história e filosofia da Ciência.

Niaz, foi realizado para avaliar a maneira pela qual os fundamentos históricos do efeito fotoelétrico são retratados, no contexto didático, em instruções para laboratório. O artigo inclui uma avaliação das bibliografias, um resumo do contexto histórico do efeito fotoelétrico, os critérios que foram aplicados ao estudo,⁴ uma descrição do método de aplicação, a apresentação dos resultados e uma discussão sobre as implicações do estudo. Os resultados apresentados pelos autores demonstram que nenhum dos 38 manuais teve uma apresentação que poderia ser classificada como excelente em todos os quatro critérios, sendo que os manuais ignoram o contexto histórico em sua elaboração.

Em 2015, Yves Gingras em Montreal no Canadá, durante as comemorações do Ano Internacional da Luz, relaciona o estudo da luz na Física Quântica com fatos históricos e evolução da teoria de Albert Einstein, a partir de aspectos físicos e matemáticos para a natureza da luz e da matéria (GINGRAS, 2015). O autor relaciona equações matemáticas aplicadas na quantização da energia em investigações com gás quântico, corpo negro e outras aplicações publicadas de 1905 a 1925. O estudo de caso chama a atenção para o poder criativo das analogias formais de Einstein, podendo ser de fundamental importância para a física teórica no ensino da Física.

Em 2016, nos Estados Unidos da América, Allan Franklin, professor de Física da Universidade do Colorado, também investiga a inclusão de eventos históricos nos livros didáticos de Física Moderna. O autor investigou como os três acontecimentos marcantes da Física moderna no século XX são apresentados no livro texto de Física (FRANKLIN, 2016): (1) o experimento de Robert Andrews Millikan sobre o efeito fotoelétrico; (2) a experiência de Michelson-Morley; (3) o experimento de Ellis-Wooster do espectro emitido no decaimento de energia. O autor destaca a incoerência na apresentação (quando é realizada) dos fatos históricos nos livros. Nos dois primeiros casos os relatos feitos pelos livros didáticos de Física estão incorretos e no terceiro caso o experimento, frequentemente, nem é mencionado. O autor conclui que é importante apresentar aos estudantes uma história real da Ciência, incluindo sucessos e insucessos.

Os artigos foram analisados com intenção de fazer uso da historicidade como estratégia didática, com o propósito de despertar a curiosidade e motivar os estudantes para o estudo do efeito fotoelétrico. A ênfase dada a alguns artigos, de modo algum ocorreu pela relevância quanto à cientificidade, porém, pela relevância para com o objetivo dessa pesquisa. Frequentemente, tanto os livros didáticos como os materiais de laboratório são componentes essenciais para a Ciência no Ensino Superior. A abordagem de fatos e eventos históricos da Ciência pode proporcionar, ao estudante, acesso à conceitos, contextos e fenômenos importantes no aprendizado da Física Quântica.

⁴ Critério 1: hipótese do Quantum de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico; critério 2: falta de aceitação da hipótese Quantum de Einstein comunidade científica; critério 3: determinação experimental de Millikan do efeito fotoelétrico de Einstein e constante de Planck, h ; Critério 4: pressupostos de Millikan sobre a natureza da Luz.

RESULTADOS DA BUSCA PARA CONSTRUÇÃO DE CONCEITOS EM EFEITO FOTOELÉTRICO

De acordo com as teorias construtivistas, estudantes formam concepções e/ou micro concepções baseadas em experiências obtidas na vida diária, antes mesmo da aprendizagem dos conceitos nas aulas de Ciências (OH, 2011; TAO; GUNSTONE, 1999). É da natureza humana construir seus próprios modelos mentais interagindo com seu ambiente social por meio do discurso, evoluindo durante as interações para alcançar um resultado viável (KÖRHASAN; ERYILMAZ; ERKOÇ, 2016). A sala de aula, de acordo com os autores, é considerada ambiente social primário para que os estudantes possam construir seus conceitos científicos, conhecendo, ou não, os modelos do ambiente social. Um dos propósitos para o ensino da Física é capacitar os estudantes a aprender sobre conceitos relacionados aos eventos experimentados na vida diária e relacioná-los com eventos físicos subjacentes à relação entre os conceitos (ÖZCAN, 2015).

Na pesquisa bibliográfica, apresentada nesta seção, investigamos os resultados dos estudos anteriores pertinentes às representações dos conceitos, pelos estudantes, sobre efeito fotoelétrico. A pesquisa demonstrou haver um número limitado de publicações nessa área, tendo os primeiros registros ocorridos há pouco mais de duas décadas. Desse modo, pouco tem-se pesquisado sobre o tema, sendo que o principal foco tem sido sobre como os estudantes aprendem e, as dificuldades e propostas didáticas associadas à construção de conceitos. Nesta seção apresentaremos as discussões pertinentes às dificuldades, concepções e modelos utilizados pelos estudantes na aprendizagem de conceitos em efeito fotoelétrico e natureza da luz, no estudo da Física Quântica.

Particularmente, em relação às dificuldades dos estudantes na Física Quântica, seguindo uma linha do tempo, a primeira ocorreu na Universidade de Sussex, na Inglaterra (JONES, 1991). De acordo com o autor, a Física Moderna é ensinada através de uma perspectiva histórica, com imagem de “Einstein dos desenhos animados” em vez de lógica, como aconteceria em outras áreas da Física. Especialmente, sobre efeito fotoelétrico, mostra como a introdução do assunto leva à imagens incorretas sobre a luz, durante a absorção e emissão de energia em moléculas. O autor relata que efeito fotoelétrico é conceito de alta importância para a compreensão da Mecânica Quântica, especialmente por se tratar da quantização de energia, entretanto, poucas vezes aparece em cursos mais avançados e que quando aparece ocorre tardiamente.

Em 1999, na Universidade de Oxford de Cingapura, Mashhadi e Woolnough afirmavam que os currículos escolares estavam em desacordo com a Física do século XX, de modo que “após noventa anos de origem da pesquisa revolucionária para a Física Quântica, estudos sobre a compreensão dos estudantes começam a emergir na comunidade científica” (MASHHADI; WOOLNOUGH, 1999). Ao compreender como os estudantes assimilam os conceitos da Física Quântica, foi realizado um estudo para verificar as concepções dos alunos sobre os fenômenos quânticos, modelos e constituição epistemológica de fundamentos teóricos implícitos ou subjacentes na estrutura cognitiva do estudante pré-universitário. Estas são concepções fortemente mantidas que os alunos

levarão com eles para cursos de graduação, o que limitará a sua compreensão da realidade quântica.

Na pesquisa foram realizados questionamentos relacionados às concepções dos estudantes de elétrons e fótons, e de como as características da luz e suas implicações com a teoria quântica ilustram as dificuldades em explicar os fenômenos através de experiências cotidianas, mas que fazem sentido no mundo subatômico. Os resultados dos estudos demonstraram que o modelo utilizado pelos estudantes para explicar o conceito de fóton foi: 38% “fóton é uma esfera brilhante (38%); um objeto pequeno, menor que o elétron (28%); um pacote de energia (14%) ou fóton tem massa e carga (10%)” (MASHHADI; WOOLNOUGH, 1999). Os autores concluem o estudo demonstrando a necessidade de desenvolver metodologias de ensino e currículos que relacionem a Física Quântica invisível com modelos que possam ser visualizados.

Por conta disso, no início do século XXI, na Universidade do Colorado (EUA), pesquisadores do projeto *Physics Education Technology* (PhET) desenvolvem simulação para ensino do efeito fotoelétrico, com o objetivo de investigar as dificuldades e/ou *insights* observados nos estudantes ao explicar os efeitos da tensão em circuitos fotoelétricos (MCKAGAN; PERKINS; WIEMAN, 2010; MCKAGAN et al. 2007, 2008a, 2008b; 2013; STEINBERG, OBEREM, MCDERMOTT, 1996, SOKOLOWSKI, 2013). Os resultados dos estudos pertinentes ao uso dessa tecnologia, neste processo, serão discutidos na próxima seção.

Em 2011, na Universidade Nacional da Coreia do Sul, Jun-Young Oh avaliou as concepções dos estudantes egressos dos cursos de Eletrônica e de Astronomia em relação ao conceito quantum de luz. O objetivo do estudo foi oferecer estratégias de ensino e suas sequências de instrução correspondentes, com base na metodologia lakatosiana, com a finalidade de mudar as concepções alternativas⁵ dos alunos para conceitos científicos, utilizando mapa de conflito sugerido por Tsai.⁶ Segundo o autor, o conceito de quantização, com base em astrofísica e Física Moderna, pode aplicar-se a todas as regiões da radiação eletromagnética. A hipótese do pesquisador é que as concepções alternativas dos estudantes tiveram origem na Física Clássica, sendo, portanto, incompatível com a Física Moderna (OH, 2011).

A pesquisa demonstra que a maioria dos estudantes resiste às mudanças de suas crenças fundamentais, no estudo de efeito fotoelétrico, utilizando hipóteses auxiliares no processo de mudança conceitual, fundamentadas nos conceitos da Física Clássica (OH, 2011). Na visão do autor, a história e filosofia da Ciência (no mapa de conflitos melhorado), juntamente com a metodologia e estratégias utilizadas pelo professor poderão ser úteis nesse processo. Também, o autor não considera que as respostas dos alunos a eventos discrepantes, baseados em suas concepções alternativas, estejam erradas.

⁵ O autor utiliza esse termo ao se reportar às concepções não científicas apresentadas pelos estudantes.

⁶ Tsai (2000) sugeriu usar o mapa de conflitos para lidar com as concepções alternativas dos alunos com base teórica no construtivismo, na solução de conflito entre as concepções alternativas dos alunos e conceitos científico.

Em 2014, nas Universidades Zonguldak e Ankara, da Turquia, uma pesquisa investiga o modelo mental dos estudantes sobre quantização da luz, energia e momento angular (DIDIŞ, ERYILMAZ e ERKOÇ, 2014). Os autores investigam como estudantes de licenciatura em Física constroem e organizam conhecimentos sobre a teoria quântica da luz, visto que quantização é um fenômeno importante para a teoria quântica, resultado de diferentes experiências práticas a serem explicadas a partir de uma mudança de paradigma na Física. Os autores verificaram que os modelos utilizados pelos estudantes eram dependentes do contexto. Na quantização da luz, os estudantes usam modelos diferentes e em diferentes contextos, para o mesmo fenômeno, mas conforme o contexto. Entretanto, para ser um bom físico, segundo os autores, o estudante deve apresentar o conhecimento científico de modo organizado, para que possa inferir durante as explicações e estabelecer relações entre os conceitos, auxiliando os estudantes a promover seus modelos por meio do uso de mapas conceituais e livros didáticos.

Em 2015, também na Turquia, Özgür Özcan realiza pesquisa pioneira para investigar as representações mentais dos estudantes para o efeito fotoelétrico, a partir da teoria quântica da luz. “Até agora, as pesquisas sobre modelos mentais e conceituais dos estudantes sobre a luz têm sido direcionadas à fenômenos como reflexão, refração, difração e interferência” (ÖZCAN, 2015, p.3). A motivação do autor foi investigar as concepções dos estudantes em fenômenos como a radiação de corpo negro, o efeito fotoelétrico e o efeito Compton, que são explicados pelo modelo quântico da luz, a partir do uso de situações do contexto dos acadêmicos. Os dados da pesquisa foram coletados junto a 110 acadêmicos, na formação de professores para o ensino da Física, em duas diferentes universidades públicas da Turquia, onde os mesmos cursavam a disciplina de Física Moderna. As representações de modelos mentais dos acadêmicos, para as diferentes situações do contexto, eram realizadas por meio de desenhos e descrições.

Özcan (2015) verificou que os dados fornecidos pelos acadêmicos apresentavam três tipos de modelos: modelo ondulatório, modelo híbrido (ondulatório e de partículas) e modelo de partículas, ao explicar diferentes contextos. Especialmente para explicar efeito fotoelétrico, os estudantes preferiam o modelo híbrido (de modo inadequado) e o modelo ondulatório, ao invés do modelo de partículas, mesclando concepções científicas e não científicas. O autor sugere a professores e pesquisadores o uso de mapas conceituais para avaliar e proporcionar aos estudantes que demonstrem a conexão dos conceitos, antes e depois da interação com o conhecimento. O professor deve, ainda, proporcionar condições para que o estudante desenvolva seus próprios modelos para o fenômeno, relacionado ao contexto explorado.

Em 2016, também na Turquia, outro grupo de pesquisadores continua a pesquisa iniciada em 2014, na investigação dos modelos construídos por estudantes de Física, para os conceitos em quantização da luz, bem como a evolução nos modelos após a interação social. Um processo conhecido como atividade dialogada, sobre contextos que envolvem o fenômeno físico, coordenada pelo professor que conduziu o diálogo com o foco na construção do conhecimento. O ponto mais forte da instrução estava em investigar como um físico realiza, na prática diária, a observação da quantização por meio de uma

informação. Os pesquisadores afirmaram que houve uma influência negativa na diferença entre as perspectivas clássicas e quânticas, nas explicações dos estudantes (KÖRHASAN; ERYILMAZ; ERKOÇ, 2016).

Outras pesquisas, publicadas nas celebrações do Ano Internacional da Luz, em homenagem aos 110 anos da publicação da revolucionária teoria quântica da luz, de Albert Einstein. Essas eram, frequentemente, voltadas às concepções da teoria quântica na evolução da Ciência e não ao ensino da Ciência, ou eram direcionadas à evolução das concepções de fóton, para o modelo quântico da luz (YAJNIK, 2015; YAJNIK, 2016; MALGIERI; ONORATO; DE AMBROSIS, 2014).

De um modo geral, a busca dos estudos sobre as representações dos estudantes demonstrou que as pesquisas nessa área são recentes e, ainda, carecem de novas investigações. As principais pesquisas foram publicadas em meados do evento em que celebrava o Ano Internacional da Luz (2015), direcionadas ao modelo mental utilizado por estudantes universitários de Física (KÖRHASAN; ERYILMAZ; ERKOÇ, 2016; DIDIŞ; ERYILMAZ; 2014; ÖZCAN, 2015). Essas demonstraram que os estudantes utilizam diferentes modelos para explicar o efeito fotoelétrico: modelo luz como onda eletromagnética (ou raio de luz), ou modelo misto (modelo ondulatório e modelo quântico) e nem sempre utilizam o modelo do *quantum* de luz, que depende do contexto aplicado. E, quanto às concepções alternativas apresentadas pelos estudantes, os resultados foram limitados pela carência de dados, evidenciando que as concepções alternativas estão relacionadas aos conhecimentos da Física Clássica (MASHHADI; WOOLNOUGH, 1999), desenvolvendo modelos equivocados na explicação dos fenômenos.

RESULTADOS DA BUSCA PARA RECURSOS DIDÁTICOS NO ENSINO DE EFEITO FOTOELÉTRICO

As pesquisas que tratam de materiais didáticos, investigadas neste artigo, foram analisadas em dois grupos: artigos que investigam o uso de simulações (ou recursos computacionais) e os que tratam do uso de atividades experimentais no ensino do efeito fotoelétrico, especialmente com o uso de células de fotovoltaicas (conforme apontado na metodologia desta pesquisa), bem como suas aplicações tecnológicas nas atividades de laboratório.

Uso de simulações computacionais em efeito fotoelétrico

Aprendizagens baseadas em simulação permite que os estudantes organizem as variáveis independentes e observem imediatamente os impactos, fornecendo um *feedback* (TAŞLIDERE, 2015). Quanto à interatividade proporcionada pela tecnologia para ensino do tema, a simulação computacional tem como benefício possibilitar aos estudantes explorar o efeito fotoelétrico, permitindo a variação das grandezas relevantes como frequência, intensidade da luz e função trabalho no metal.

Como pioneiro na busca, estudo foi localizado na Universidade de Washington para o uso de simulações computacionais com a intenção de avaliar a aprendizagem dos estudantes para efeito fotoelétrico (STEINBERG; OBEREM; MCDERMOTT, 1996). Na investigação foi desenvolvido um tutorial, apoiado no uso de simulação computacional, para explorar as dificuldades conceituais e cognitivas, identificadas através de entrevistas, e análise de questões da prova de exame.

O estudo demonstrou que muitos estudantes não têm uma compreensão no modelo experimental de efeito fotoelétrico, conforme a teoria quântica de Einstein. Para os autores, os estudantes apresentam as seguintes concepções: (i) que a tensão ($V = R \cdot i$) interfere no efeito fotoelétrico; (ii) dificuldade de diferenciar intensidade da luz (fluxo de fótons) da frequência da luz (energia do fóton); (iii) crença de que o fóton é um objeto com carga; (iv) eram incapazes de fazer qualquer previsão de representação gráfica da corrente pela tensão em um experimento que envolva efeito fotoelétrico ou (v) incapacidade de dar qualquer explicação sobre fótons no efeito fotoelétrico (STEINBERG; OBEREM; MCDERMOTT, 1996). A pesquisa foi de singular importância para o desenvolvimento de simulações computacionais⁷ realizadas pelo projeto *Physics Education Technology* (PhET), na Universidade do Colorado.

Uma década depois, nos EUA, outro grupo de pesquisadores (MCKAGAN et al., 2007) avalia (a) o uso de simulações computacionais para ensino de efeito fotoelétrico, acompanhadas por aulas expositivas e atividades de resolução de problemas (em atividade de casa), e (b) como os estudantes utilizam o modelo de fóton de luz. Após analisar as respostas dos estudantes, os pesquisadores observaram que eles eram capazes de prever os resultados dos experimentos sobre efeito fotoelétrico, inclusive para efeitos na variação de tensão – que foi uma das dificuldades relatadas em pesquisa anterior (STEINBERG; OBEREM; MCDERMOTT, 1996). Já na análise das questões para avaliar a concepção dos estudantes sobre o fóton de luz, a maioria indicou, corretamente, as observações e as inferências envolvidas no efeito fotoelétrico. No ano seguinte, outro estudo foi realizado pelo mesmo grupo de pesquisadores (MCKAGAN et al., 2008), avaliando o uso de simulações computacionais do Projeto *Physics Education Technology* (PhET).

Ainda em 2008, no Brasil, Sales e colaboradores utilizam modelagem exploratória do objeto de aprendizagem Pato Quântico para realizar um experimento com estudantes de Ensino Médio, no qual poderiam explorar efeito fotoelétrico com cálculo da constante de *Planck* para diferentes materiais. “A interação dos estudantes com o software resultou em uma aprendizagem significativa do fenômeno efeito fotoelétrico, com eficiente transposição didática dos conteúdos e o fortalecimento de mudança conceitual” (SALES et al., 2008, p.3501-11). Os autores sugerem que a metodologia utilizada pode auxiliar os estudantes na construção de novos modelos na Física Quântica, visto que o *Dossiê* utilizado na avaliação demonstrou a compreensão conceitual em efeito fotoelétrico.

⁷ A simulação encontra-se disponível em: <https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>.

Em 2012, também no Brasil, simulação computacional para o ensino de efeito fotoelétrico do projeto PhET foi utilizada em conjunto com sequências de atividades: organizadores prévios, simulação computacional com roteiro de atividades e mapa conceitual como organizador explicativo, atividades elaboradas a partir da teoria da aprendizagem significativa, de modo a contribuir com a organização da estrutura de conceitos (CARDOSO; DICKMAN, 2012). Os autores sugerem que, em trabalhos futuros, seja realizado o aprofundamento da teoria de Ausubel, no sentido de avaliar a eficácia do uso de simulações computacionais na aprendizagem significativa, tornando os conceitos mais inclusivos na estrutura cognitiva dos estudantes.

Em 2013, no Texas (EUA), Andrzej Sokolowski aplica a simulação computacional PhET, para efeito fotoelétrico, a um grupo de estudantes de Ensino Médio. Os estudantes foram submetidos a uma pergunta descritiva, com o propósito de investigar seus *insights* em relação à função da bateria em um circuito fotoelétrico (SOKOLOWSKI, 2013). O propósito dessa investigação era observar os processos de raciocínio dos estudantes, comparando com as concepções observadas nas pesquisas anteriores (MCKAGAN et al., 2009; STEINBERG; OBEREM; MCDERMOTT, 1996). Após o uso das simulações, a maioria dos estudantes respondeu corretamente explicando a finalidade da bateria, sendo que, alguns tinham a certeza do motivo pelo qual a bateria não contribuiu para o aumento na intensidade da fotocorrente.

Em 2015, Erdal Taşlıdere da Universidade Mehmet Akif Ersoy da Turquia apresentaram resultados similares aos de Washington (STEINBERG; OBEREM; MCDERMOTT, 1996), em quatro turmas na formação de professores de Ciências ao utilizar simulação computacional em efeito fotoelétrico (TAŞLIDERE, 2015). Os acadêmicos foram divididos em grupo experimental (com uso de simulações computacionais) e grupo controle (com ensino tradicional), estudando o mesmo assunto. A análise das provas, com questões abertas, envolvendo 5E (engajamento, exploração, explicação, elaboração e avaliação) demonstrou que alguns dos estudantes consideravam o potencial fornecido como condição preliminar para o fluxo de corrente no circuito fotoelétrico.

O autor utiliza o modelo 5E do seguinte modo: na fase engajamento, além de atrair a atenção dos acadêmicos, são avaliadas as suas concepções; na fase de exploração, os estudantes têm o primeiro contato com fenômenos científicos; na fase de explicação, com ajuda do professor, os estudantes têm a oportunidade de explicitar seu entendimento; na fase de elaboração, são proporcionadas novas experiências para a compreensão dos estudantes e, na fase de avaliação os estudantes são incentivados a avaliar o seu próprio entendimento e auxiliar o professor a avaliar o seu desenvolvimento quanto aos objetivos educacionais (TAŞLIDERE, 2015). A pesquisa sugere que novas investigações venham integrar as simulações computacionais com o ciclo 5E, a fim de avaliar a eficácia na aprendizagem de conceitos em efeito fotoelétrico.

Laboratório experimental na contextualização do tema

A literatura precedente a esta pesquisa indica que a instrução de laboratório, com estudantes de Ensino Superior, para o efeito fotoelétrico, surgiu a partir de 1960 (KLASSEN et al., 2012). Porém, segundo os autores, o trabalho experimental sobre efeito fotoelétrico passou a ser utilizado após desenvolvimento em eletrônica do estado sólido, com a superação de dificuldades técnicas. Entretanto, a execução dos experimentos era limitada e bastante complexa (WRIGHT, apud KLASSEN et al., 2012). Por conta disso, há poucos trabalhos com foco específico em aspectos pedagógicos no uso de laboratório para efeito fotoelétrico, conforme observado nas buscas bibliográficas para a construção desta pesquisa. A pesquisa bibliográfica demonstrou que o uso de recursos experimentais, fundamentados em proposta didático-pedagógica para o ensino do tema, apresenta dois fatores limitadores: a escassez de dados em pesquisas e a complexidade na execução delas em laboratório experimental de Física.

Entre os exemplos, no Brasil, experimento com uso de lâmpada de Hg foi realizado na Universidade Federal de São Carlos (SP), em cursos de Licenciatura de Física (PARANHOS; LOPEZ-RICHARD; PIZANI, 2008). O experimento foi desenvolvido com objetivo didático (introdução do efeito fotoelétrico) e prático (uso de equipamento em práticas para as demonstrações do fenômeno). Os autores destacam a importância do desenvolvimento didático (especialmente na formação de professores) e aspectos vinculados à segurança dos estudantes. O projeto forneceu desafios no desenvolvimento de competências práticas, didáticas e de pesquisa para estudantes de licenciatura.

Conforme relatado na metodologia, nas buscas por trabalhos associados à natureza da luz, os termos (*quantum* de luz e *quantum* de energia) sugeriram o uso de células fotovoltaicas em aulas de Física. O princípio de funcionamento da tecnologia fundamenta-se na transformação de luz em corrente. Os artigos analisados, a seguir, demonstram que o uso experimental da tecnologia, no ensino de Física, foi impulsionado, nos últimos anos, por dois fatores: as tratativas acordadas no protocolo de Quioto (2008 a 2012), em reduzir os gases de efeito estufa (SARK, 2007) e o movimento STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*), com foco na educação para o desenvolvimento de competências na liderança global do conhecimento (DARK, 2011).

O primeiro estudo de busca localizou, na Universidade Monash, na Austrália, pesquisadores que desenvolveram um experimento muito simples, com estudantes universitários, nas aulas de Física, no intuito de avaliar medidas de corrente e tensão (I-V) em uma célula solar fotovoltaica, bem como, fatores que interferem na eficiência da célula de silício na conversão da luz em energia (MORGAN; JAKOVIDIS; MCLEOD, 1994).

Na Holanda, em 2007 Wilfried van Sark utiliza as células fotovoltaicas para motivar mestrandos a realizarem atividades práticas em sala de aula, nas quais calculam o rendimento anual do painel fotovoltaico, incidência da radiação solar, tensão e outras variáveis utilizando planilhas. A partir dos cálculos da eficiência fotovoltaica e rendimento anual, em âmbito de conversão de energia, nas atividades são realizados comparativos

entre a eficiência no campus da Universidade de Utrecht e o deserto do Saara Africano. A pesquisa conclui que o tema “energia fotovoltaica” é tecnologia em energia renovável para ser usado em ensino, podendo fazer parte de cursos de pós-graduação. Os princípios básicos das células fotovoltaicas podem ser ensinados em aulas de Engenharia ou Física, a partir de semicondutores, entretanto, o desempenho (rendimento anual) dos painéis fotovoltaicos, muitas vezes não é tratada (SARK, 2007).

Em 2010, ainda, em se tratando da eficiência energética das células fotovoltaicas, em Abu Dhabi (Emirados Árabes Unidos), Arman Molki do Instituto do Petróleo, desenvolve um experimento para avaliar a perda de eficiência gerada pelo acúmulo de poeira sobre o painel, devido à abundância de areia no local. O autor sugere que o tema “energias renováveis” seja incluso nos currículos de Ciências, nas instituições de Ensino Primário e Secundário nos países dos Emirados Árabes Unidos (EAU), uma vez que, estes países dependem fortemente das exportações de petróleo e gás, com o propósito de educar a população local a investir na radiação solar usando células fotovoltaicas. Molki (2010) utiliza o experimento de célula solar simples, realizado em pesquisa anterior (MORGAN; JAKOVIDIS; MCLEOD, 1994), para calcular a potência máxima de geração de um painel fotovoltaico e, sob diversas situações de acúmulo de pó, determina a perda de eficiência de conversão, em comparação com um painel fotovoltaico limpo. O experimento pode ser realizado em sala de aula ou ao ar livre, em um período mais longo (semana ou mensal) de acúmulo natural de poeira, utilizando iluminação natural ou artificial.

No Departamento de Física da Faculdade de *Spelman* (EUA), Marta L Dark desenvolve o projeto “Módulo Células Fotovoltaicas”, para um curso de verão para público feminino, na inserção de Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM), com oito mulheres que irão ingressar em uma faculdade de público feminino (DARK, 2011). A autora afirma que acadêmicos interessados nas carreiras em Ciência da Tecnologia e Engenharia, nos próximos dez anos devem encontrar muitas oportunidades na área. Entre as conquistas da pesquisa, a autora destaca a importância da tecnologia na aquisição de novos conhecimentos pelos estudantes, entre os quais, o fato de que a corrente e a tensão diminuem à medida que a temperatura aumenta nas células fotovoltaicas de silício. Quanto às habilidades matemáticas, os estudantes realizam coleta e análise de dados, gráficos, análise de incertezas e conversão de unidades. Por fim, o trabalho desenvolvido na pesquisa proporcionou, aos estudantes, desenvolvimento de comunicação científica (artigo) e interesse por carreira na Ciência e na Engenharia.

Ainda, em 2011, na Universidade de Toulouse na França, foi investigado como podem ser caracterizados e testados os valores (potência, corrente e tensão) expressos pelos fabricantes, por estudantes de graduação (BOITIER; CRESSAULT, 2011). Os estudantes também investigaram o efeito dos vários parâmetros (a tecnologia utilizada, a intensidade da iluminação, temperatura, posição geográfica, inclinação), para a eficiência na produção de energia. Para facilitar o estudo dos dados, os estudantes construíram uma estação automática, com uso de computador. Os autores apontam que, realizar trabalhos experimentais com fontes renováveis de energia motiva os estudantes à aprendizagem, inclusive para outros conceitos e outras áreas (com funcionamento da tecnologia ou custos).

No ano de 2013, no colégio de Davidson de Carolina do Norte (EUA), Tim Gfroerer utiliza o painel solar fotovoltaico como recurso didático para explorar as leis da Física para os circuitos elétricos, na disciplina de Eletrônica. O autor considera o painel solar fotovoltaico um excelente recurso para as aulas, podendo auxiliar no estudo os circuitos e, ainda, relacionar o conhecimento com a preservação ambiental. Nesse sentido, para um futuro energético mais sustentável, os sistemas fotovoltaicos compostos por séries de módulos solares serão cada vez mais comuns. No contexto estudantes têm uma participação importante na transição para tecnologias de energia alternativa, de modo que a familiaridade com os parâmetros operacionais subjacentes de dispositivos como módulos solares será cada vez mais valiosa (GFROERER, 2013).

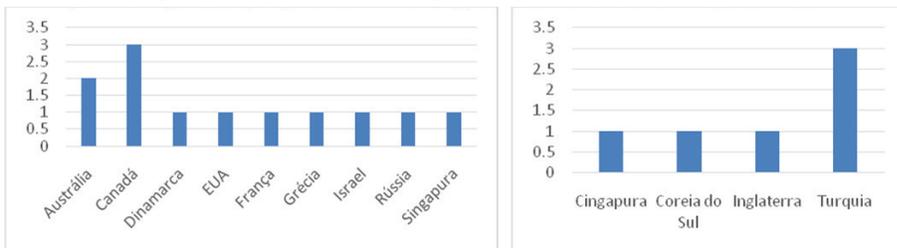
Ainda em 2013 e nos EUA, o uso de atividades práticas com células solares foi aplicado em atividade de aprendizagem sinestésica, no ensino do efeito fotoelétrico (RICHARDS; ETKINA, 2013). Segundo os autores, as células solares têm sido apresentadas para incentivar a participação dos estudantes no ensino dos conceitos no efeito fotoelétrico e, conseqüentemente, melhorar os resultados de aprendizagem. A explicação física para o funcionamento das células solares fotovoltaicas é comumente fundamentada na teoria dos semicondutores, com células de silício em eletricidade. “O silício, nesse caso, se comporta como isolante até que haja uma fonte de energia externa, como a luz do Sol, capaz de ‘dar um impulso’ em seus elétrons da banda de valência para a banda de condução, tornando-os portadores de corrente” (RICHARDS; ETKINA, 2013, p.578).

A situação contexto, aplicada na produção e transformação da luz, oportunizou o desenvolvimento de vasto campo, na indústria da energia, por meio dos painéis fotovoltaicos. A energia solar fotovoltaica passa a ser tema de discussão em ensino de Ciências, especialmente nas Engenharias. A pesquisa demonstrou que a tecnologia é aplicável à diferentes níveis de ensino (fundamental à pós-graduação), podendo ser utilizada para explorar uma variedade de conceitos científicos e matemáticos. Trata-se de uma tecnologia mundialmente conhecida. As primeiras observações do efeito fotoelétrico remontam ao início do século XIX, a partir de obras de Alexandre Edmond Becquerel, Heinrich Hertz, Wilhelm Hallwachs e Joseph John Thomson (DEMMING, 2010) e foram esclarecidas no artigo publicado por Albert Einstein, em 1905, no qual associa o *quantum* da luz à natureza da luz.

DISCUSSÕES E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da busca bibliográfica em meio eletrônico demonstraram que pesquisas sobre efeito fotoelétrico, a partir do conceito quântico da luz, são recentes. Até 2005, poucas pesquisas haviam sido publicadas: três que tratam da historicidade; duas que tratam de como os estudantes aprendem; uma sobre simulação e uma sobre uso de laboratório (Gráfico 1). Por conta disso, não limitou-se o período das publicações nas buscas. Constatou-se que a maioria das pesquisas disponíveis na rede mundial de computadores foi publicada de 2005 a 2015. Nesse período, conforme relatado, dois

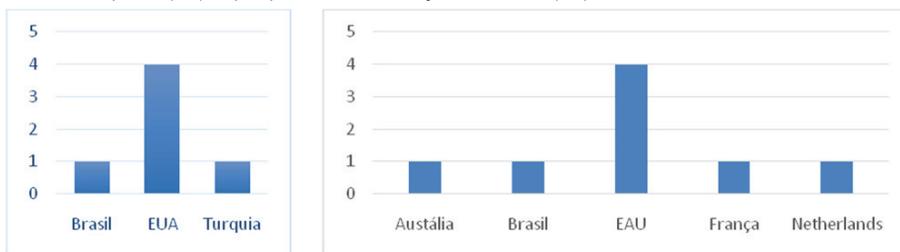
GRÁFICO 2 – (a) À esquerda, país de origem das pesquisas que tratam da historicidade. (b) À direita, país de origem das pesquisas sobre concepções dos estudantes em efeito fotoelétrico.



Fonte: autores.

Quanto ao uso de recursos didáticos, no uso de simulações computacionais houve maior concentração de pesquisas nos Estados Unidos da América (Gráfico 3.a). Na maioria dos estudos, para esta categoria, foi utilizada a simulação de efeito fotoelétrico, desenvolvida pelo grupo PhET da Universidade do Colorado. E, no uso de laboratório experimental, especificamente para conceitos subjacentes à transformação da luz ou natureza da luz ou *quantum* de luz, verificamos que houve uma convergência de publicações nos Emirados Árabes Unidos (Gráfico 3.b).

GRÁFICO 3 – Países de origem das pesquisas relacionadas aos materiais didáticos para ensino da Física: À esquerda (3.a) as pesquisas sobre simulações e à direita (3.b) sobre uso de laboratório real.



Fonte: autores.

A aplicação de contexto para uso de laboratório experimental, provavelmente emergiu por dois movimentos distintos: O primeiro devido às necessidades de mudanças na matriz energética. Ao longo das últimas duas décadas órgãos governamentais têm desempenhado um papel fundamental no avanço do uso de tecnologias em energia renovável para a Educação, proporcionando informações úteis para educadores e estudantes, especialmente nos EUA (MOLKI, 2010). O segundo, provavelmente é possível relacionar à aplicação de contexto com a possibilidade de inserção do estudante no movimento Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática (STEM), incentivando os estudantes à atuação nessas áreas (DARK, 2011). O movimento STEM tem como propósito, neste contexto da pesquisa, proporcionar ao estudante o desenvolvimento

de competências e habilidades para o desenvolvimento profissional e, especialmente no ensino das Engenharias, o estudo quântico da luz ganha um contexto de aplicação significativo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A composição do estado da arte sobre a historicidade, conceito e contexto em pesquisas relacionadas à produção e transformação da luz no efeito fotoelétrico, nos proporcionou algumas respostas relevantes à nossa pergunta de pesquisa. Conforme descrito no início desse artigo buscamos responder, por meio da busca de pesquisas, a seguinte pergunta: como as pesquisas associadas à produção e transformação da luz, para ensino de Ciências, têm relacionado historicidade, construção de conceito e contexto?

As duas datas históricas (2005 e 2015), que celebraram o artigo de Albert Einstein (1905), influenciaram, significativamente, as mudanças no ensino de Ciências. A evidência, na relevância dos eventos, para as pesquisas sobre efeito fotoelétrico foi observada em todas as áreas investigadas no trabalho: na historicidade, construção de conceitos e uso de materiais didáticos (simulações computacionais e laboratório real). A partir dos dados pode-se concluir que um evento histórico, na Ciência, pode engajar educadores e estudantes no desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia e, como, neste caso, contribuir para mudanças no Planeta e no uso dos recursos.

Nas pesquisas em historicidade houve uma concordância entre os pesquisadores do Canadá (KLASSEN, 2011; KLASSEN et al., 2012; NIAZ et al., 2010). Abordagens de fatos e eventos históricos que marcaram a ciência do século XX, em especial, sobre efeito fotoelétrico a partir da publicação de Albert Einstein sobre a teoria quântica da luz, limitado ao ensino de Ciências, observando-se que, muitas vezes, os fatos são distorcidos de forma a não retratar a maneira como eles realmente aconteceram (KRAGH, 1992). Também, há uma convergência dessas pesquisas para a reflexão quanto à relevância do uso historicidade no ensino de efeito fotoelétrico.

Quanto à primeira pergunta auxiliar nessa pesquisa (Quais dificuldades foram observadas, em estudantes, no aprendizado de conceitos referente ao efeito fotoelétrico?), não encontramos uma resposta clara sobre a representação conceitual dos estudantes em efeito fotoelétrico. Algumas pesquisas demonstram que o modelo mental dos conceitos de fóton, utilizado pelos acadêmicos, é comumente associado a “esferas de luz” (MASHHADI; WOOLNOUGH, 1999). Ao explicar a natureza da luz, a hipótese dos autores é que os estudantes utilizam conceitos e princípios clássicos da luz (OH, 2011). A fim de auxiliar os estudantes na construção de conceitos científicos para o efeito fotoelétrico, as pesquisas indicam o uso de simulações computacionais (MCKAGAN et al., 2008). Segundo o autor, a simulação pode auxiliar na investigação das concepções apresentadas pelos estudantes ou avaliar *insights* apresentados durante a construção dos conceitos.

De certo modo, a suposição nos auxiliou a responder a segunda pergunta auxiliar da pesquisa: quais são os recursos didáticos utilizados pelos professores na construção de conhecimentos acerca do efeito fotoelétrico? Concluiu-se que no uso das simulações computacionais, como recurso didático para o ensino do tema, a simulação do grupo PhET foi a mais indicada para a construção de conceitos em efeito fotoelétrico. Autores têm apontado que quando utilizada com uma proposta didática (como 5E) podem ser um bom recurso na construção de conceito, inclusive para mudanças nas concepções dos estudantes (TAŞLIDERE, 2015). O uso desse recurso também foi indicado a fim de proporcionar aos estudantes a aprendizagem significativa dos conceitos (CARDOSO; DICKMAN, 2012)

Por último, quanto à pergunta associada ao uso de recursos para laboratório experimental em efeito fotoelétrico: qual tem sido a situação contexto, especialmente de aplicação nas Engenharias, explorada nas pesquisas investigadas?, as pesquisas demonstram que o uso de atividades experimentais para o ensino do tema apresentam desafios, tanto na complexidade dos experimentos, quanto na segurança dos experimentos (PARANHOS; LOPEZ-RICHARD; PIZANI, 2008). A análise das pesquisas acessadas demonstra que a aplicação de contexto permite, também, relacionar o experimento com outros componentes curriculares como: leis aplicadas aos circuitos elétricos; eficiência energética na transformação da luz; semicondutores; entre outros. A expansão da disseminação da tecnologia fotovoltaica no ensino pode, conseqüentemente, motivar a sociedade para o uso da energia do Sol, em diferentes aplicações.

Quanto à possibilidade de relacionar historicidade, conceito e contexto em efeito fotoelétrico, ou no estudo da natureza quântica da luz, o estudo demonstrou a necessidade de investigação prática e didática, aplicando o uso de tecnologia fotovoltaica como situação de contexto. Possivelmente, a união destas áreas pode ser um ponto importante para uma verdadeira compreensão, por parte de estudantes, da produção e transformação da luz e efeito fotoelétrico, sob a ótica da Mecânica Quântica. As pesquisas demonstraram, ainda, a possibilidade do uso da situação contexto para inserir o estudante no movimento STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*), como tem demonstrado pesquisa no uso dessa tecnologia nos EUA (DARK, 2011).

REFERÊNCIAS

- ALADOV, A. V. et al. On modern high-power leds and their lighting application. *Light & Engineering*, v.18, n.3, p.16-29, 2010.
- BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. 70.ed. Rio de Janeiro: Lisboa, 2007.
- BOITIER, V.; CRESSAULT, Y. Characterization of photovoltaic generators. *European Journal of Physics*, v.32, n.3, p.657-674, maio 2011.
- CARDOSO, S. O. DE O.; DICKMAN, A. G. Simulação computacional aliada à teoria da aprendizagem significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v.29, n. especial, p.891-934, out. 2012.

DARK, M. L. A photovoltaics module for incoming science, technology, engineering and mathematics undergraduates. *Physics Education*, v.46, n.3, p.303-308, maio 2011.

DAVIDOVICH, L. Os quanta de luz e a ótica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.37, n.4, p.4205-1-4205-12, dez. 2015.

DEMMING, A. Solar harvest. *Nanotechnology*, v.21, n.49, p.490201-490201, dez. 2010.

DIDIŞ, N.; ERYILMAZ, A.; ERKOÇ, Ş. Investigating students' mental models about the quantization of light, energy, and angular momentum. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, v.10, n.2, p.20127, nov. 2014.

ESHACH, H. The Nobel Prize in the Physics Class: Science, History, and Glamour. *Science & Education*, v.18, n.10, p.1377-1393, out. 2009.

FRANKLIN, A. Physics Textbooks Don't Always Tell the Truth. *Physics in Perspective*, v.18, n.1, p.3-57, abr. 2016.

GFROERER, T. Circuits in the Sun: Solar Panel Physics. *The Physics Teacher*, v.51, n.7, p.403-405, out. 2013.

GINGRAS, Y. The Creative Power of Formal Analogies in Physics: The Case of Albert Einstein. *Science & Education*, v.24, n.5-6, p.529-541, jul. 2015.

JENKIN, J. G. et al. The development of X-ray photoelectron spectroscopy (1900-1960): a postsclnpt. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, v.14, p.477-485, 1978.

JENKIN, J.; LECKEY, R.; LIESEGANG, J. The development of x-ray photoelectron spectroscopy: 1900-1960. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, v.12, n.1, p.1-35, jan. 1977.

JONES, D. G. C. Teaching modern physics: Misconceptions of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, v.26, n.2, p.93-98, 1991.

JUNG, W. Toward preparing students for change: A critical discussion of the contribution of the history of physics in physics teaching. *Science & Education*, v.3, n.2, p.99-130, abr. 1994.

KLASSEN, S. et al. Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in Laboratory Instructions. *Science & Education*, v.21, n.5, p.729-743, maio 2012.

KLASSEN, S. The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education*, v.20, n.7-8, p.719-731, jul. 2011.

KÖRHASAN, N. D.; ERYILMAZ, A.; ERKOÇ, Ş. The influence of instructional interactions on students' mental models about the quantization of physical observables: a modern physics course case. *European Journal of Physics*, v.37, n.1, p.15701, jan. 2016.

KRAGH, H. A Sense of History: History of Science and the Teaching of Introductory Quantum Theory. *Science & Education*, v.1, p.349-363, 1992.

MALGIERI, M.; ONORATO, P.; DE AMBROSIS, A. Teaching quantum physics by the sum over paths approach and GeoGebra simulations. *European Journal of Physics*, v.35, n.5, p.55024, set. 2014.

MASHHADI, A.; WOOLNOUGH, B. Insights into students' understanding of quantum physics: Visualizing quantum entities. *European journal of physics*, v.20, n.6, p.511-516, 1999.

MCKAGAN, S. B. et al. A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect. *American Journal of Physics*, v.77, n.1, p.87-94, jan. 2009.

MCKAGAN, S. B. et al. A Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect. *Physics Education*, v.1, n.0706.2165, p.1-9, 2007.

MCKAGAN, S. B. et al. Developing and researching PhET simulations for teaching quantum mechanics. *American Journal of Physics*, v.76, n.4, p.406-417, abr. 2008.

MCKAGAN, S. B.; PERKINS, K. K.; WIEMAN, C. E. Design and validation of the Quantum Mechanics Conceptual Survey. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, v.6, n.2, p.20121, nov. 2010.

MOLKI, A. Dust affects solar-cell efficiency. *Physics Education*, v.45, n.5, p.456-458, set. 2010.

MORGAN, M. J.; JAKOVIDIS, G.; MCLEOD, I. An experiment to measure the I-V characteristics of a silicon solar cell. *Physics Education*, v.29, n.4, p.252-254, jul. 1994.

MOURA, J. J. G. et al. Química Bioinorgânica e Luz Fotossíntese, Oxigênio e Água. *Química*, v.136, n.1, p.17-19, 2015.

NIAZ, M. et al. Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications for general physics textbooks. *Science Education*, v.94, n.5, p.903-931, set. 2010.

OH, J.-Y. Using an enhanced conflict map in the classroom (photoelectric effect) based on Lakatosian heuristic principle strategies. *International Journal of Science and Mathematics Education*, v.9, n.5, p.1135-1166, out. 2011.

OON, P. T.; SUBRAMANIAM, R. The nature of light: II. A historical survey from the Planck era and implications for budding physicists. *Physics Education*, v.44, n.4, p.392-397, jul. 2009.

ÖZCAN, Ö. Investigating students' mental models about the nature of light in different contexts. *European Journal of Physics*, v.36, n.6, p.65042, nov. 2015.

PARANHOS, R. R. G.; LOPEZ-RICHARD, V.; PIZANI, P. S. Lâmpada de Hg para experimentos e demonstrações de física moderna: introdução ao efeito fotoelétrico e outros tópicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.30, n.4, p.4502.1-4502.6, dez. 2008.

RAMOS, A. DE F.; SERRANO, A. Modelagem molecular no Ensino de Ciências: uma revisão da literatura no período 2001-2011 acerca da sua aplicabilidade em atividades de ensino. *Acta Scientiae*, v.15, n.2, p.363-382, 2013.

RICHARDS, A. J.; ETKINA, E. Kinaesthetic learning activities and learning about solar cells. *Physics Education*, v.48, n.5, p.578-585, set. 2013.

SALES, G. L. et al. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.30, n.3, p.3501.1-3501.13, 2008.

SARK, W. G. J. H. M. VAN. Teaching the relation between solar cell efficiency and annual energy yield. *European Journal of Physics*, v.28, n.3, p.415-427, maio 2007.

SOKOŁOWSKI, A. Teaching the photoelectric effect inductively. *Physics Education*, v.48, n.1, p.35-41, jan. 2013.

SRIRAMAN, B. An Ode to Imre Lakatos: Quasi-Thought Experiments to Bridge the Ideal and Actual Mathematics Classrooms. *Interchange*, v.37, n.1-2, p.151-178, abr. 2006.

STEINBERG, R. N.; OBEREM, G. E.; MCDERMOTT, L. C. Development of a computer-based tutorial on the photoelectric effect. *American Journal of Physics*, v.64, n.11, p.1370-1378, 1996.

TAMPAKIS, C.; SKORDOULIS, C. The History of Teaching Quantum Mechanics in Greece. *Science & Education*, v.16, n.3-5, p.371-391, fev. 2007.

TAO, P.-K.; GUNSTONE, R. F. The process of conceptual change in force and motion during computer-supported physics instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, v.36, n.7, p.859-882, set. 1999.

TAŞLIDERE, E. A Study Investigating the Effect of Treatment Developed by Integrating the 5E and Simulation on Pre-service Science Teachers' Achievement in Photoelectric Effect. *EURASIA Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, v.11, n.5, p.1-16, set. 2015.

YAJNIK, U. A. The conception of photons – Part I. *Resonance*, v.20, n.12, p.1085-1110, dez. 2015a.

YAJNIK, U. A. The conception of photons – Part I. *Resonance*, v.20, n.12, p.1085–1110, dez. 2015b.