

O ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO MÉDIO: UMA ABORDAGEM INVESTIGATIVA COM FUNDAMENTOS DA HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA

TEACHING THE PHOTOELECTRIC EFFECT IN HIGH SCHOOL: AN INQUIRY-BASED APPROACH GROUNDED IN THE HISTORY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE

LA ENSEÑANZA DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO EN LA EDUCACIÓN SECUNDARIA: UN ENFOQUE INVESTIGATIVO FUNDAMENTADO EN LA HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

 <https://doi.org/10.56238/arev8n2-129>

Data de submissão: 27/01/2026

Data de publicação: 27/02/2026

Tiago Martins Moura

Doutorando em Ensino

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

E-mail: tiagomartins@uern.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-6530-9530>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5973953696152510>

Cristiane de Carvalho Ferreira Lima Moura

Doutora em Ensino de Ciências e Matemática

Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

E-mail: cristianecarvalho@ufersa.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0988-3623>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3795214129484005>

Maria Goretti Silva

Mestra em Educação

Instituição: Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN)

E-mail: goretti@ufersa.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1634-9771>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5377779592860241>

Natália Rocha Celedonio

Doutoranda em Ensino

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)

E-mail: nataliarocha@ufersa.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-1212-5949>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3321690740706983>

Lidiane Martins Moura Ferreira

Doutora em Fitotecnia

Instituição: Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

E-mail: lidiane.martins@ufersa.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1125-524X>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0074391587319803>

RESUMO

A permanência de práticas tradicionais no Ensino de Física, ainda centradas na exposição de conteúdos e na aplicação mecânica de fórmulas, tem dificultado a compreensão conceitual de temas da Física Moderna no Ensino Médio, entre eles o Efeito Fotoelétrico. Considerando as orientações da Base Nacional Comum Curricular e a necessidade de abordagens que promovam problematização e argumentação científica, este artigo tem como objetivo apresentar uma proposta investigativa para o ensino do Efeito Fotoelétrico, articulada a elementos da História e Filosofia da Ciência. Trata-se de um estudo de natureza teórico-bibliográfica e propositiva que sistematiza uma organização didática estruturada a partir de uma situação-problema contextualizada envolvendo sensores crepusculares. A proposta mobiliza conhecimentos prévios, fomenta a formulação e o confronto de hipóteses e conduz à sistematização conceitual do modelo quântico da luz, evidenciando os limites da interpretação clássica ondulatória. A incorporação de episódios históricos favorece a compreensão da transição entre modelos explicativos e da natureza da ciência. Como resultado, delinea-se uma organização didática viável ao contexto escolar, a proposta de ensino pretendida, capaz de favorecer a compreensão da interação radiação-matéria e do papel da frequência na emissão fotoelétrica. Conclui-se que a abordagem investigativa, integrada a recursos digitais e avaliação formativa, contribui e é viável e pertinente para ensino médio para uma aprendizagem mais significativa e coerente com as diretrizes curriculares vigentes.

Palavras-chave: Ensino de Física. Efeito Fotoelétrico. Ensino Médio. Abordagem Investigativa. História e Filosofia da Ciência.

ABSTRACT

The persistence of traditional practices in Physics Education, still centered on content exposition and the mechanical application of formulas, has hindered students' conceptual understanding of Modern Physics topics in High School, including the Photoelectric Effect. Considering the guidelines of the Brazilian National Common Curricular Base and the need for approaches that promote problematization and scientific argumentation, this article aims to present an inquiry-based proposal for teaching the Photoelectric Effect articulated with elements of the History and Philosophy of Science. This is a theoretical-bibliographic and propositional study that systematizes a didactic organization structured around a contextualized problem situation involving light sensors. The proposal mobilizes prior knowledge, fosters hypothesis formulation and confrontation, and leads to the conceptual systematization of the quantum model of light, highlighting the limitations of the classical wave interpretation. The incorporation of historical episodes supports the understanding of transitions between explanatory models and of the nature of science. As a result, a didactic organization suitable for the school context is outlined, capable of promoting comprehension of radiation-matter interaction and the role of frequency in photoelectric emission. It is concluded that the inquiry-based approach, integrated with digital resources and formative assessment, is viable and pedagogically relevant for High School, contributing to more meaningful learning aligned with current curricular guidelines.

Keywords: Physics Education. Photoelectric Effect. High School. Inquiry-Based Approach. History and Philosophy of Science.

RESUMEN

La permanencia de prácticas tradicionales en la Enseñanza de la Física, aún centradas en la exposición de contenidos y en la aplicación mecánica de fórmulas, ha dificultado la comprensión conceptual de temas de la Física Moderna en la Educación Secundaria, entre ellos el Efecto Fotoeléctrico. Considerando las orientaciones de la Base Nacional Común Curricular de Brasil y la necesidad de enfoques que promuevan la problematización y la argumentación científica, este artículo tiene como objetivo presentar una propuesta investigativa para la enseñanza del Efecto Fotoeléctrico, articulada con elementos de la Historia y Filosofía de la Ciencia. Se trata de un estudio de carácter teórico-bibliográfico y propositivo que sistematiza una organización didáctica estructurada a partir de una situación-problema contextualizada relacionada con sensores crepusculares. La propuesta moviliza conocimientos previos, fomenta la formulación y confrontación de hipótesis y conduce a la sistematización conceptual del modelo cuántico de la luz, evidenciando los límites de la interpretación clásica ondulatoria. La incorporación de episodios históricos favorece la comprensión de la transición entre modelos explicativos y de la naturaleza de la ciencia. Como resultado, se delinea una organización didáctica viable para el contexto escolar, capaz de favorecer la comprensión de la interacción radiación-materia y del papel de la frecuencia en la emisión fotoeléctrica. Se concluye que el enfoque investigativo, integrado con recursos digitales y evaluación formativa, es viable y pertinente para la Educación Secundaria, contribuyendo a un aprendizaje más significativo y coherente con las directrices curriculares vigentes.

Palabras clave: Enseñanza de la Física. Efecto Fotoeléctrico. Educación Secundaria. Enfoque Investigativo. Historia y Filosofía de la Ciencia.

1 INTRODUÇÃO

Os conteúdos de Física Moderna ocupam lugar estratégico no Ensino Médio por possibilitarem a compreensão de fenômenos que fundamentam tecnologias amplamente presentes no cotidiano. No entanto, sua abordagem em sala de aula nem sempre favorece uma compreensão conceitual consistente. Em muitos casos, esses temas são apresentados de forma sintética, excessivamente formal ou desvinculada dos problemas científicos que lhes deram origem, tendendo a transformá-los em conteúdos fragmentados e pouco significativos para os estudantes (Nardi, 2001).

Entre esses conteúdos, o Efeito Fotoelétrico destaca-se por marcar a transição entre a Física clássica e a Física Moderna. O fenômeno evidencia limites do modelo ondulatório da luz ao demonstrar que a emissão de elétrons por determinados materiais depende da frequência da radiação incidente e não apenas de sua intensidade, como previa a interpretação clássica (Nussenzvieg, 1997). Essa ruptura conceitual ultrapassa o âmbito técnico e abre espaço para discussões epistemológicas sobre a construção do conhecimento científico.

No contexto escolar, a dimensão problematizadora desse episódio histórico-científico nem sempre é explorada. O Efeito Fotoelétrico costuma ser apresentado como aplicação direta de equações sem se investigarem as evidências experimentais que desafiaram a física clássica e motivaram novas interpretações. Ao desconsiderar esse percurso histórico e conceitual, perde-se a oportunidade de discutir a ciência como atividade dinâmica, construída a partir de debates, tensões e reformulações teóricas (Delizoicov; Angotti; Pernambuco, 2002).

As orientações curriculares brasileiras, especialmente a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), enfatizam o desenvolvimento de competências relacionadas à investigação de fenômenos, à argumentação baseada em evidências e à análise crítica de aplicações tecnológicas (Brasil, 2018). Nesse horizonte, o ensino do Efeito Fotoelétrico pode contribuir significativamente para articular Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) ao possibilitar a análise de dispositivos como sensores ópticos e células fotovoltaicas e outros dispositivos presentes no cotidiano dos estudantes.

A incorporação de elementos da História e Filosofia da Ciência (HFC) potencializa essa abordagem ao evidenciar que os modelos científicos são construções provisórias, formuladas em contextos específicos e sujeitas a revisão diante de novos dados experimentais (Gil-Pérez, 1993; Cachapuz et al., 2005). Tal perspectiva favorece uma compreensão menos dogmática da ciência e mais coerente com sua natureza histórica, contribuindo para a formação de uma postura investigativa e crítica.

Diante dessas considerações, este artigo parte da seguinte questão de pesquisa: de que modo uma proposta investigativa, articulada a elementos da HFC, à contextualização das relações entre

CTSA e à inserção de Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação (TDICs), pode favorecer a compreensão conceitual do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio a partir de uma situação-problema contextualizada?

Nessa perspectiva, considera-se que a incorporação das TDICs pode ampliar as possibilidades de visualização, simulação e análise desse fenômeno, desde que orientada por objetivos de intencionalidades pedagógicas claros e coerentes com a construção de significados científicos.

Em consonância com essa questão, o objetivo deste trabalho é apresentar e sistematizar uma proposta investigativa para o ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio, estruturada em torno de uma situação-problema envolvendo sensores crepusculares e orientada pela problematização, formulação e confronto de hipóteses e posterior sistematização conceitual do modelo quântico da luz. Pretende-se evidenciar como essa organização didática pode contribuir para a compreensão do papel da frequência na emissão fotoelétrica para a identificação dos limites da interpretação clássica ondulatória e para a análise de aplicações tecnológicas associadas à interação entre radiação e matéria em consonância com as diretrizes curriculares vigentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO E O DESAFIO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A inserção de temas da Física Moderna no Ensino Médio tem sido defendida como parte de uma formação científica coerente com as demandas contemporâneas, sobretudo quando vinculada à compreensão de tecnologias presentes no cotidiano. As orientações curriculares nacionais, em especial da BNCC, reforçam a centralidade de práticas que favoreçam investigação, argumentação baseada em evidências e leitura crítica de fenômenos naturais e tecnológicos, deslocando o ensino de uma lógica estritamente transmissiva para experiências de aprendizagem com sentido e significado (Brasil, 2018).

Nesse cenário, o Efeito Fotoelétrico adquire relevância por marcar a transição entre modelos físicos clássicos e quânticos e por permitir interpretar aplicações como sensores, dispositivos optoeletrônicos, células fotovoltaicas, dentre outros.

Apesar dessa relevância, a literatura educacional e a experiência escolar evidenciam um problema recorrente: o Efeito Fotoelétrico costuma ser apresentado como um “episódio pronto” da Física Moderna, frequentemente reduzido à exposição do enunciado e da equação, com pouca exploração dos conflitos conceituais que o tornam significativo.

Nesse modo de ensinar, o estudante tende a memorizar relações sem compreender o ponto central do fenômeno: a existência de uma frequência mínima (ou frequência de corte) e a distinção entre o papel da frequência na ocorrência da emissão e o papel da intensidade na quantidade de elétrons emitidos. Quando isso não é explicitado por meio de problematização e mediação didática consistente, persistem interpretações intuitivas (por exemplo, a crença de que “mais intensidade sempre garante emissão”), que entram em choque com o comportamento observado em experimentos e aplicações (Nussenzveig, 1997).

Assim, sustentar uma proposta de ensino do Efeito Fotoelétrico para o Ensino Médio exige reconhecer que o obstáculo não é apenas matemático: é epistemológico. O tema se torna potente quando o estudante percebe que o modelo clássico, embora bem-sucedido em muitos contextos, não explica certos resultados experimentais que a mudança de modelo não é um “capricho teórico”, mas uma resposta a evidências. É justamente essa passagem (da explicação ondulatória clássica a uma descrição quântica) que precisa aparecer didaticamente como uma construção e não como uma simples troca de fórmulas.

2.2 APRENDIZAGEM COMO CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS E O PAPEL DA PROBLEMATIZAÇÃO

A superação de práticas escolares centradas na transmissão mecânica de conteúdos permanece como desafio histórico da educação. Na crítica educacional, Freire (1968) caracteriza a educação bancária como uma forma de ensino que reduz o estudante à recepção de informações, enfraquecendo o diálogo e a problematização.

Em outra chave, Rubem Alves (2010) aponta que modelos escolares excessivamente rígidos podem limitar a curiosidade, criatividade e o engajamento discente. Essa crítica ganha contornos ainda mais sensíveis em temas como o Efeito Fotoelétrico, porque a aprendizagem depende do estudante atribuir sentido ao “porquê” da mudança de modelo e não apenas ao “como” calcular uma grandeza.

Do ponto de vista psicológico e pedagógico, a compreensão conceitual pode ser favorecida quando o ensino se organiza de modo a relacionar novas informações a estruturas já existentes, permitindo que o aluno reelabore suas ideias. Ausubel (1985) destaca que a aprendizagem ganha significado quando o novo conhecimento se ancora, de forma não arbitrária, no que o estudante já sabe.

Piaget (1998) contribui ao situar o conflito cognitivo como motor de reorganização conceitual por meio de movimentos de desequilíbrio e reequilíbrio. Vygotsky (1987), por sua vez, enfatiza a

mediação social e linguística, destacando que o avanço conceitual não ocorre isoladamente, mas em interação (por exemplo, professor e aluno ou entre alunos em discussão de grupos), sobretudo na Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP).

Em termos curriculares, esse conjunto de contribuições converge com a exigência de aprendizagens que articulem compreensão, argumentação e aplicação crítica do conhecimento mais do que reprodução de procedimentos (Brasil, 2018).

Nessa direção, o Efeito Fotoelétrico se torna um conteúdo especialmente fértil para o trabalho com construção de significados, porque pode ser ensinado como um ponto de tensão entre explicações concorrentes, mobilizando hipóteses e confrontando previsões com evidências, em vez de ser apresentado como conclusão definitiva desde o início, uma vez que aprender implica em construir significados e estabelecer relações (Resnick, 1983).

2.3 ENSINO POR INVESTIGAÇÃO, HFC E ARTICULAÇÕES CTSA E TDICs

Uma das formas mais consistentes de operacionalizar essa mudança de perspectiva é o ensino por investigação. Gil-Pérez (1993) e Cachapuz et al. (2005) defendem modelos centrados em situações-problema que mobilizam conhecimentos prévios, estimulam formular hipóteses e promovem o confronto argumentativo até a sistematização do conhecimento. Nessa abordagem, a situação-problema não funciona como “exercício aplicado”, mas como disparador de perguntas reais, capaz de tornar explícitas concepções iniciais e de criar condições para sua reconstrução.

No caso do Efeito Fotoelétrico, o trabalho com elementos HFC fortalece ainda mais a estrutura investigativa porque ajuda o estudante a perceber que a ciência não se resume a verdades prontas: ela envolve debates, limites de teorias, experimentos decisivos e mudanças conceituais. Episódios históricos, quando integrados com intencionalidade didática, favorecem a compreensão da natureza da ciência, da transição entre modelos explicativos e do papel das evidências no desenvolvimento do conhecimento (Cachapuz et al., 2005). Além disso, a problematização pode ser enriquecida por vínculos das relações entre CTSA ao colocar o fenômeno em diálogo com tecnologias e escolhas sociais que dependem da interação radiação-matéria, aproximando o conteúdo da experiência concreta do estudante (Brasil, 2018).

O uso de TDICs também pode ampliar a visualização e a exploração do fenômeno, desde que não se transforme em substituto do raciocínio conceitual. Simulações e recursos digitais tendem a ser produtivos quando entram como instrumentos para testar hipóteses, facilitar a dinâmica e visualização do fenômeno em questão, comparar previsões e interpretar resultados, mantendo a centralidade da argumentação e da mediação docente. Em outras palavras, HFC, CTSA e TDIC não aparecem como

“acréscimos decorativos”, mas como dispositivos que ajudam a sustentar o percurso investigativo e a tornar o fenômeno compreensível no nível de escolarização do Ensino Médio.

2.4 AVALIAÇÃO FORMATIVA, TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA E INCLUSÃO

Coerente com o ensino por investigação, a avaliação não pode se limitar à verificação final de respostas corretas. Campos e Nigro (1999) defendem uma avaliação integrada ao processo, capaz de acompanhar avanços e dificuldades e orientar com precisão intervenções pedagógicas. Pozo (2009) reforça essa ideia ao propor estratégias avaliativas contínuas e multidimensionais que permitam observar como o estudante reorganiza suas explicações e quais obstáculos persistem. No Efeito Fotoelétrico, isso é particularmente importante porque muitas dificuldades aparecem no nível explicativo: o aluno pode até repetir a equação, mas continuar interpretando o fenômeno sob uma lógica clássica de “energia contínua” dependente apenas da intensidade.

Além disso, ensinar Física Moderna no Ensino Médio exige atenção à transposição didática. Não se trata de “simplificar” a Física universitária, mas de reorganizar o saber científico em saber escolar, preservando sua coerência e sua potência explicativa em linguagem acessível e alinhada ao currículo (Delizoicov; Angotti; Pernambuco, 2002). Nessa perspectiva, materiais como os do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF, 1993) e orientações do Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) 2024, já articulam, em alguns casos, estratégias investigativas a situações cotidianas e a elementos da HFC, CTSA e TDICs, apoiando o professor na seleção e organização do conteúdo de modo a evitar o formalismo matemático como fim em si mesmo.

Por fim, uma proposta investigativa coerente com a BNCC deve considerar a dimensão inclusiva do ensino. A organização de atividades em grupo, o uso de múltiplas linguagens (texto, debate, simulação, registros), a explicitação progressiva de conceitos e o acompanhamento formativo favorecem a participação equitativa, desde que o professor planeje intervenções que reconheçam diferentes ritmos, especificidades e modos de aprendizagem dos discentes (Brasil, 2018).

Assim, o referencial teórico aqui sistematizado sustenta uma proposta de ensino do Efeito Fotoelétrico que busca produzir compreensão conceitual por meio de problematização, investigação, mediação e sentido histórico-epistemológico no lugar da transmissão mecânica de fórmulas.

3 METODOLOGIA

Este estudo apresenta-se como uma investigação de caráter propositivo, desenvolvida a partir de abordagem qualitativa e fundamentada em pesquisa teórico-bibliográfica. Ao propor uma organização didática para o ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio, o artigo não se apoia em

aplicação empírica direta, mas na análise crítica de referenciais consolidados no campo do Ensino de Física e do Ensino de Ciências.

A pesquisa bibliográfica, conforme assinala Gil (2010), possibilita examinar e articular produções já elaboradas, como livros, artigos científicos e documentos normativos, permitindo sistematizar fundamentos teóricos pertinentes ao problema em questão. A opção pela abordagem qualitativa decorre do interesse em compreender implicações pedagógicas, sentidos conceituais e possibilidades de reorganização didática do conteúdo, priorizando a interpretação em vez da quantificação de dados.

Lüdke e André (2013) ressaltam que investigações dessa natureza buscam apreender significados e relações presentes nos referenciais analisados, enquanto Bogdan e Biklen (1994) destacam que o foco recai sobre a compreensão contextualizada do fenômeno estudado. Ainda que não envolva sujeitos ou coleta de dados em campo, o presente trabalho compartilha dessa orientação ao examinar criticamente como o Efeito Fotoelétrico é abordado no âmbito escolar e quais alternativas podem favorecer sua compreensão conceitual.

O desenvolvimento metodológico partiu da delimitação de um problema didático específico: a recorrente apresentação do Efeito Fotoelétrico como aplicação algébrica isolada, desvinculada dos conflitos conceituais que marcaram a transição entre a interpretação clássica e a quântica da luz.

A partir dessa delimitação, procedeu-se à análise dos seguintes eixos: contribuições dos elementos da HFC para o ensino de Física Moderna, fundamentos do ensino por investigação, articulações CTSA, uso pedagógico das TDICs e orientações curriculares nacionais com ênfase na BNCC. Buscou-se identificar convergências teóricas e lacunas no tratamento escolar do tema, especialmente no que se refere à distinção entre intensidade e frequência da radiação incidente.

Diante disso, elaborou-se a proposta investigativa apresentada no artigo. A organização didática foi estruturada em torno de uma situação-problema contextualizada envolvendo sensores crepusculares, contemplando levantamento de conhecimentos prévios, formulação e confronto de hipóteses, inserção orientada de episódios históricos e sistematização conceitual do modelo quântico da luz. A formalização matemática foi mantida ao nível compatível com o Ensino Médio, preservando a coerência científica do fenômeno sem reduzir o ensino a procedimentos operacionais.

Como limitação, reconhece-se que a proposta não foi validada empiricamente no escopo deste trabalho, configurando-se como organização didática fundamentada em literatura especializada e aberta a futuras investigações de aplicação e análise em contexto escolar. Por se tratar de estudo de natureza teórica e propositiva, não houve participação de estudantes nem coleta de dados empíricos, dispensando procedimentos éticos relacionados à pesquisa com seres humanos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O exame crítico da literatura selecionada ao longo deste trabalho possibilitou delinear uma organização didática voltada ao ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio, concebida a partir da articulação entre levantamento das concepções iniciais dos estudantes, problematização ancorada em contexto tecnológico concreto e construção progressiva do modelo científico com mediação docente e suporte de elementos da HFC, relações CTSA e TDICs.

Considerando que se trata de um estudo de caráter teórico-bibliográfico e propositivo, os resultados apresentados concentram-se na explicitação dessa organização pedagógica e na análise de suas contribuições formativas discutidas à luz das produções acadêmicas da área.

4.1 ORGANIZAÇÃO DA PROPOSTA DIDÁTICA

A proposta organiza-se em etapas sequenciais e interdependentes, concebidas para favorecer a reconstrução conceitual do Efeito Fotoelétrico a partir de um problema concreto. O ponto de partida consiste no levantamento das concepções iniciais dos estudantes acerca de luz, energia, intensidade luminosa e frequência. Esse mapeamento pode ser realizado por meio de um breve pré-teste diagnóstico ou por leitura orientada de texto curto que explore noções dessa temática. O objetivo não é classificar respostas, mas tornar visíveis ideias prévias, frequentemente ancoradas na concepção de que maior intensidade luminosa implica maior energia transferida.

A situação-problema proposta é a seguinte: postes com sensores crepusculares acendem ao anoitecer e se apagam ao amanhecer, respondendo de modo diferente a lâmpadas LED e incandescentes. Pergunta-se, então: o funcionamento do sensor depende apenas da intensidade da luz incidente ou a frequência da radiação e o material do sensor também influenciam o processo?

Organizados em pequenos grupos, os estudantes discutem a situação proposta e registram suas hipóteses explicativas. Com frequência, surgem interpretações baseadas exclusivamente na intensidade da luz, evidenciando uma compreensão intuitiva próxima ao modelo clássico ondulatório. Essa concepção remete à formulação de Maxwell, em 1865, que unificou eletricidade e magnetismo ao demonstrar que perturbações nos campos elétrico e magnético propagam-se no vácuo com velocidade:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

cujo valor numérico aproxima-se de $3,0 \times 10^8$ m/s, coincidindo com a velocidade da luz no vácuo. A partir dessa correspondência, Maxwell concluiu que a luz era uma onda eletromagnética, e, nesse quadro teórico, a energia transportada pela radiação relacionava-se à sua intensidade de modo contínuo (Nussenzvieg, 1997).

É nesse ponto que a mediação docente se torna decisiva e necessária. O professor solicita que os grupos explicitem suas justificativas, promove o confronto entre argumentos e conduz a reflexão para além da explicação clássica, abrindo espaço para a introdução dos impasses experimentais que desafiaram o modelo ondulatório e impulsionaram o surgimento da Física Moderna.

A sistematização conceitual é conduzida articulando a situação-problema aos episódios históricos. Em 1887, Hertz observou que a incidência de radiação da luz ultravioleta facilitava descargas elétricas entre eletrodos metálicos. O fenômeno, posteriormente investigado por Lenard, em 1902, revelou dois resultados incompatíveis com a Física Clássica: a existência de um potencial e frequência mínima abaixo da qual não ocorre emissão de elétrons e a dependência da energia cinética dos elétrons da frequência da luz e não da intensidade. Esses resultados explicitam o limite do modelo ondulatório clássico (GREF, 1993).

A ruptura conceitual ganha maior clareza com a introdução da hipótese de Planck, em 1900, segundo a qual a energia (J) é quantizada e expressa por:

$$E = hf \quad (2)$$

em que h é a constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ J·s) e f a frequência (Hz) da radiação.

Em 1905, Einstein, com base na lei da conservação da energia, aplicou essa ideia de Planck ao fenômeno fotoelétrico, propondo que a luz é composta por fótons (partículas associadas a quantidades discretas de energia) e formulando a equação do Efeito Fotoelétrico:

$$E = \phi + K_{\max} \quad (3)$$

onde ϕ (J) representa a função trabalho do material, caracterizada pela estrutura eletrônica do material e $K_{\max}$ (J) a energia cinética máxima do elétron ejetado. Daí decorre a condição de emissão:

$$hf \geq \phi \quad (4)$$

definindo-se a frequência de corte $f_0 = \phi / h$ (Nussenzvieg, 1997).

Para $f < f_0$, não há emissão, mesmo com luz intensa; para $f \geq f_0$, os elétrons são ejetados e o sensor é acionado. Isso mostra que a cor da luz, associada à sua f , é decisiva para o funcionamento do sensor, explicando por que algumas lâmpadas são mais eficazes que outras.

Uma vez satisfeita a condição $f \geq f_0$, a intensidade da luz passa a atuar no processo, pois seu aumento leva o número de fótons incidentes por unidade de tempo, resultando em maior emissão de elétrons e, portanto, em maior corrente fotoelétrica. Assim, a intensidade controla a quantidade de elétrons emitidos, enquanto a ocorrência do efeito depende da f . Como a ϕ é característica do material, diferentes sensores apresentam f_0 distintas, quanto maior ϕ , maior é f_0 e vice-versa.

Do ponto de vista energético, na emissão fotoelétrica, a energia do fóton incidente é dividida em duas partes: uma para vencer a do material e outra convertida em energia cinética máxima do elétron $K_{\text{máx}}$ (J) emitido, sendo $K_{\text{máx}} = eV_0$ (4). Esse balanço energético é expresso pela equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico, $E = \phi + K_{\text{máx}}$ (3), pondo (2) em (3), fica:

$$hf = \phi + K_{\text{máx}} \quad (5)$$

Assim, evidencia-se que a energia dos elétrons depende da f da luz e não de sua intensidade, em contraste com a Física clássica.

Embora essa explicação corpuscular descreva adequadamente o Efeito Fotoelétrico, ela não explica fenômenos ondulatórios da luz, como difração e interferência, observados no experimento de Young (1801), evidenciando a dualidade onda-partícula da luz como onda eletromagnética.

Assim, a discussão amplia-se ao problematizar a dualidade onda-partícula. O experimento de Young, em 1801, demonstrou interferência luminosa, confirmando o caráter ondulatório da luz. Posteriormente, Compton, em 1923, reforçou o caráter corpuscular ao observar o espalhamento de raios X por elétrons, evidenciado pelo aumento do comprimento de onda dependente do ângulo, interpretado como uma colisão entre partículas, onde o fóton transfere energia e momento por meio de:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/m_e c)(1 - \cos\theta) \quad (6)$$

Assim, pela primeira vez, consolidou-se o entendimento de que a luz não pode ser descrita exclusivamente como onda ou como partícula. Em interações com a matéria, como no Efeito Fotoelétrico, manifesta comportamento corpuscular, conforme a interpretação de Einstein; em fenômenos de propagação, como interferência e difração, evidencia natureza ondulatória, conforme

demonstrado no experimento de Young (1801). Essa tensão entre modelos não representa contradição, mas ampliação do quadro explicativo da Física (GREF, 1993).

A dualidade onda-partícula foi estendida além da radiação por De Broglie, em 1924, ao propor que o comportamento dual não se restringe à luz, mas se aplica a toda a matéria. Segundo sua hipótese, a cada partícula com quantidade de movimento p associa um comprimento de onda dado por:

$$\lambda = h/p \quad (7)$$

em que λ representa o comprimento de onda (m) e h a constante de Planck (J·s). Para partículas não relativísticas, como elétrons em diversos experimentos, o momento linear pode ser expresso por:

$$p = mv \quad (8)$$

sendo m a massa (kg) e v a velocidade (m/s). Substituindo (8) em (7), obtém-se:

$$\lambda = h/mv \quad (8)$$

Essa relação evidencia que, quanto maior for a quantidade de movimento da partícula, menor é o comprimento de onda associado, tornando seu caráter ondulatório menos perceptível. No entanto, para partículas leves e velocidades moderadas, como elétrons, o comprimento de onda pode ser comparável às dimensões atômicas, possibilitando a observação experimental de difração eletrônica no experimento de Davisson e Germer, em 1927, confirmando empiricamente a hipótese de De Broglie e consolidando a base conceitual da Física Moderna.

A mudança paradigmática em curso foi aprofundada por Heisenberg, também em 1927, ao formular o Princípio da Incerteza, expresso por:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi \quad (9)$$

Essa relação estabelece limites fundamentais à determinação simultânea da posição (x) e do momento (p) de uma partícula, indicando que o próprio ato de medir interfere no sistema observado. No ano seguinte, Bohr sintetizou essa nova compreensão ao propor o Princípio da Complementaridade (1928), segundo o qual as descrições ondulatória e corpuscular são mutuamente

necessárias para a explicação completa dos fenômenos quânticos, embora não possam ser observadas simultaneamente no mesmo arranjo experimental (Nussenzvieg, 1997).

No âmbito da proposta didática, o percurso histórico não é apresentado como mera sequência cronológica de descobertas, mas como recurso para compreender o conflito conceitual enfrentado pela própria ciência. Ao retomar a situação-problema dos sensores crepusculares, os estudantes passam a reconhecer que o acionamento do dispositivo depende da energia do fóton incidente, da função trabalho (ϕ) característica do material e da frequência da radiação. A intensidade luminosa, embora influencie a corrente gerada após a emissão, não determina sua ocorrência se a condição $hf \geq \phi$ (4) não for satisfeita.

Essa articulação entre problema concreto, tensão histórica e formalização progressiva do modelo científico torna visíveis os limites da interpretação clássica, segundo a qual bastaria aumentar a intensidade da luz para ampliar a energia transferida. Ao evidenciar que não há emissão quando a frequência é inferior à frequência de corte f_0 , mesmo sob radiação intensa, a proposta introduz de forma conceitualmente consistente os fundamentos da Física Moderna.

Desse modo, a resolução da situação-problema explicita que o Efeito Fotoelétrico depende de três fatores inter-relacionados: a frequência da radiação que condiciona a ocorrência da emissão, a intensidade que regula a quantidade de elétrons ejetados e o material do sensor que define a função trabalho e, consequentemente, a frequência de corte. O fenômeno deixa de ser apresentado como aplicação isolada de uma equação e exemplifica a transição entre modelos explicativos distintos.

À luz das orientações da BNCC, essa abordagem favorece a compreensão da natureza da ciência e das relações entre CTSA ao analisar dispositivos como sensores ópticos, portas automáticas, alarmes, células fotovoltaicas, dentre muitos outros. Ao explorar tais aplicações, o estudante amplia a interpretação do conceito e constrói significados para além do contexto escolar, reconhecendo sua presença em tecnologias cotidianas.

Para consolidar a aprendizagem, o uso de TDICs como as simulações interativas do Physics Education Technology (PhET), permite observar dinamicamente a interação entre radiação-matéria, manipulando frequência, intensidade e material do metal. Nessas atividades, os estudantes relacionam f , E , ϕ e f_0 , fortalecendo a compreensão conceitual, evitando que a matemática seja reduzida a procedimento algorítmico descontextualizado.

Com isso, encerra-se a organização da proposta didática, que integra problematização, mediação conceitual, elementos da HFC, articulações CTSA e uso intencional de TDICs, abrindo caminho para a discussão de suas implicações pedagógicas na subseção seguinte.

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS À LUZ DA LITERATURA

A organização didática sistematizada converge com pressupostos construtivistas ao mobilizar conhecimentos prévios e promover conflito cognitivo, favorecendo reorganização conceitual progressiva. A problematização inicial revela-se fundamental para tornar explícitas concepções alternativas, permitindo que a formalização matemática surja como resposta a um impasse explicativo e não como imposição externa.

A incorporação de elementos da HFC amplia a compreensão da natureza do conhecimento científico. Ao evidenciar os conflitos entre a interpretação clássica e a quântica, a proposta contribui para superar visões dogmáticas da ciência como conjunto de verdades acabadas. Essa perspectiva está alinhada às orientações curriculares que enfatizam argumentação, análise crítica e contextualização.

A mediação docente mostra-se decisiva para manter o equilíbrio entre rigor conceitual e participação discente. A matemática não é eliminada, mas reintegrada como instrumento explicativo. As equações deixam de ser fórmulas a serem aplicadas mecanicamente e expressam relações físicas interpretáveis.

A articulação com recursos digitais e aplicações tecnológicas amplia o alcance formativo do conteúdo, reforçando sua pertinência no contexto contemporâneo. Entretanto, por tratar-se de sistematização teórica, a proposta ainda carece de validação empírica em contexto escolar específico, apresentando-se como possibilidade para investigações futuras.

De modo geral, os resultados discutidos indicam que o ensino problematizado do Efeito Fotoelétrico, articulado à HFC, às relações CTSA e ao uso intencional de TDICs, constitui alternativa consistente para introduzir fundamentos da Física Moderna no Ensino Médio. Ao evidenciar os limites da Física Clássica e explicitar os conflitos que deram origem à descrição quântica, a proposta favorece uma compreensão conceitualmente mais sólida, crítica e contextualizada do fenômeno.

5 CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo apresentar e sistematizar uma proposta investigativa para o ensino do Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio, articulada a elementos da HFC, relações CTSA e a TDICs. A partir de uma pesquisa de natureza teórico-bibliográfica e caráter propositivo, delineou-se uma proposta didática centrada em uma situação-problema contextualizada no acionamento de sensores crepusculares como estratégia para mobilizar concepções iniciais, favorecer a problematização e conduzir à construção progressiva do modelo quântico da luz.

Os resultados discutidos indicam que a proposta possibilita tratar o Efeito Fotoelétrico para além do uso isolado de equações, tornando visível o núcleo conceitual do fenômeno: a condição de

emissão associada à frequência de corte, a função trabalho do material e a distinção entre o papel da frequência (ocorrência do efeito) e da intensidade (quantidade de elétrons emitidos após a condição ser satisfeita).

Ao integrar episódios históricos, de Young passando por Maxwell, Hertz, Panck, Lenard, Einstein, Compton, De Brogli, Davisson e German, Heisenberg e Bohr, com a explicitação das tensões entre explicações clássicas e modernas, a sequência favorece uma compreensão menos dogmática da ciência e mais próxima de sua dinâmica real, marcada por impasses experimentais, disputa de interpretações, quebras de paradigmas, reformulações teóricas.

Do ponto de vista pedagógico, a proposta mostra-se viável de ser aplicada no contexto escolar por reunir pontos positivos objetivos: parte de um problema tecnológico próximo do cotidiano, organiza etapas claras (diagnóstico, hipóteses, confronto argumentativo e sistematização), preserva formalização matemática compatível com o Ensino Médio sem reduzir o tema a procedimentos algorítmicos e abre espaço para avaliação formativa ao longo do processo por meio de registros, sínteses e justificativas.

O uso de simulações interativas como o PhET, quando orientado por perguntas e metas conceituais, tende a ampliar a visualização do fenômeno e a apoiar a interpretação das relações entre frequência, energia e material, reforçando a aprendizagem com significado.

Em síntese, a proposta apresentada constitui uma alternativa consistente para introduzir fundamentos da Física Moderna no Ensino Médio em consonância com as orientações da BNCC, ao promover investigação, argumentação e leitura crítica de fenômenos e aplicações tecnológicas.

Como limite, por se tratar de um estudo propositivo, a organização didática não foi testada empiricamente no escopo deste trabalho, apontando a necessidade de investigações futuras que implementem a sequência em sala de aula e analisem evidências de aprendizagem e desafios de mediação docente. Ainda assim, a sistematização realizada oferece um caminho didático fundamentado e replicável para o Efeito Fotoelétrico ser ensinado como construção conceitual significativa e não como mera aplicação de fórmulas.

AGRADECIMENTOS

Os(As) autores(as) agradecem à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) e à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), instituições às quais os(as) autores(as) estão vinculados(as) como servidores(as), pelo apoio institucional ao desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, registram agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor e a bolsa de Apoio à Difusão do Conhecimento do CNPq - Nível 1C, da segunda e quarta autora.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Rubem. Conversas com quem gosta de ensinar. 13. ed. Campinas: Papirus, 2010.
- AUSUBEL, David P. Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva. Lisboa: Plátano, 1985.
- BOGDAN, Robert; BIKLEN, Sari. Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto Editora, 1994.
- BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, DF: MEC, 2018.
- CACHAPUZ, Antonio et al. A necessária renovação do ensino de ciências. São Paulo: Cortez, 2005.
- CAMPOS, M. C.; NIGRO, R. G. Didática de ciências: o ensino-aprendizagem como investigação. São Paulo: FTD, 1999.
- DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. Ensino de ciências: fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2002.
- FREIRE, Paulo. Pedagogia do oprimido. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1968.
- GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GIL-PÉREZ, D. Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. Enseñanza de las Ciencias, v. 11, n. 2, p. 197-212, 1993.
- GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). Física. v. 1–3. São Paulo: EDUSP, 1993.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. Fundamentos de física. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- LÜDKE, Menga; ANDRÉ, Marli E. D. A. Pesquisa em educação: abordagens qualitativas. 2. ed. São Paulo: EPU, 2013.
- NUSSENZVEIG, H. Moysés. Curso de física básica: ótica, relatividade e física quântica. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. v. 4.
- NARDI, Roberto (org.). Pesquisas em ensino de Física. São Paulo: Escrituras, 2001.
- PIAGET, Jean. A formação do símbolo na criança. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- POZO, Juan Ignacio. Aprendizes e mestres: a nova cultura da aprendizagem. Porto Alegre: Artmed, 2009.
- VYGOTSKY, Lev S. A formação social da mente. São Paulo: Martins Fontes, 1987.