



Ensino & Pesquisa

Ensino & Pesquisa magazine is an interdisciplinary journal of the State University of Paraná (UNESPAR), Center for Humanities and Education. Its objective is to publish scientific articles focused on undergraduate and teacher education. Quadrennial Classification 2013-2016 - Teaching B1. (Preprints Policy-AUTHOREA Platform) ISSN: 2359-4381

Um estudo dos invariantes operatórios mobilizados por estudantes da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico

Bianca Cintra de Carvalho, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática da Universidade Estadual de Maringá, Mestre em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá, biancacintra1992@gmail.com

Luciano Carvalhais Gomes, Doutor em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá, Mestre em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática pela Universidade Estadual de Maringá, Professor do Departamento de Física e do Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e a Matemática (PCM) da Universidade Estadual de Maringá, lbgomes2@uem.br

Resumo: Este trabalho tem por objetivo apresentar os invariantes operatórios mobilizados por alunos da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico em situações didáticas. A aplicação desse estudo ocorreu em um colégio particular da cidade de Nova Esperança – Paraná, no ano de 2019. Como sujeitos da pesquisa, participaram quarenta e três alunos da terceira série do Ensino Médio. Com base em nossos objetivos de pesquisa, para a constituição dos dados, realizamos uma observação participante e, como instrumento de coleta de dados, utilizamos questionários. Para este artigo, selecionamos três questões, aplicadas ao longo de uma atividade didática, nas quais abordamos sobre o efeito fotoelétrico. Inicialmente, discutimos o processo de eletrização de um eletroscópio e as possíveis formas de descarregá-lo. Na sequência, apresentamos novamente o experimento e pedimos para que testassem descarregar com uma fonte de luz (lanterna do celular e Luzes de LED coloridas). Após esse momento, promovemos uma discussão acerca dos conceitos que envolvem o efeito fotoelétrico. Em nossa análise, a maioria dos invariantes operatórios mobilizados no primeiro momento, antes da realização do experimento, consideravam que a luz, por não ser partícula e sim uma onda, não seria capaz de interagir com os elétrons e descarregar o eletroscópio. Ao serem questionados novamente, após testarem experimentalmente a luz descarregando o eletroscópio, percebe-se uma diversidade de conceitos e teoremas-em-ação mobilizados, os quais buscam em seus esquemas já existentes, encaixar o que foi observado. Por fim, na análise da terceira atividade didática, após a investigação experimental e conceitual do efeito fotoelétrico, percebe-se a mobilização de invariantes operatórios mais próximos do conhecimento científico. Sem a pretensão de esgotar o assunto, esperamos que os resultados encontrados contribuam para uma melhor compreensão dos invariantes operatórios sobre efeito fotoelétrico e subsidiem caminhos para abordar a Física Moderna, em especial a Física Quântica, no Ensino Médio.

Palavras-chave: Física Moderna, Invariantes operatórios, Efeito fotoelétrico.

A study of operative invariants mobilized by third-grade high school students on the photoelectric effect

Abstract: This work aims to present the operative invariants mobilized by third-grade high school students on the photoelectric effect in didactic situations. The application of this study took place in a private school in the city of Nova Esperança – Paraná, in 2019. As research subjects, forty-three students from the third grade of

high school participated. Based on our research objectives, for the constitution of the data we carried out participant observation and, as a data collection instrument, we used questionnaires. For this article, we selected three questions, applied during a didactic activity, in which we address the photoelectric effect. Initially, we discussed the process of electrifying an electroscope and possible ways to discharge it. Afterwards, we present the experiment again and asked them to test it with a light source (cell flashlight and colored LED). After this moment, we promote a discussion about the concepts that involve the photoelectric effect. In our analysis, most of the operative invariants mobilized in the first moment, before the experiment was carried out, considered that light, as it's not a particle but a wave, would not be able to interact with electrons and discharge the electroscope. When questioned again, after experimentally testing the light by discharging the electroscope, a diversity of mobilized concepts and theorems-in-action is perceived, which seek to fit what was observed in their existing schemes. Finally, in the analysis of the third didactic activity, after the experimental and conceptual analysis of the photoelectric effect, the mobilization of operative invariants closer to scientific knowledge can be seen. Without intending to exhaust the subject, we hope that the results found will contribute to a better understanding of the operative invariants on the photoelectric effect and support ways to approach Modern Physics, especially Quantum Physics, in High School.

Keywords: Modern Physics, Operative invariants, Photoelectric effect.

Submissão: 2022-01-22. **Aprovação:** 2022-04-21 – **Publicação:** 22-04-30

Introdução

Inúmeras pesquisas na área de Ensino de Física sinalizam a importância de inserir a Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio (NARDI; MONTEIRO; BASTOS FILHO, 2009; OSTERMANN; MOREIRA, 2000; PINTO; ZANETIC, 1999; SILVA; ALMEIDA, 2011). Dentro dos pressupostos estabelecidos pelos PCNEM e PCN+, em consonância com os problemas enfrentados pelo ensino de Física, a inserção da Física Moderna possibilita um ensino mais atualizado e contextualizado (OLIVEIRA; VIANNA; GERBASSI, 2007).

Ostermann e Moreira (2000) destacam algumas razões para a inserção de Física Moderna nas escolas: desperta a curiosidade dos alunos e auxilia no reconhecimento da Física como um empreendimento humano, próximo a eles; possibilita motivar os jovens para as carreiras científicas, visto que eles serão os futuros professores e pesquisadores em Física; e, além disso, o ensino de questões atuais da Física pode contribuir na formação de uma visão melhor da ciência e da natureza do trabalho científico, superando a ideia de desenvolvimento linear que tem permeado os livros didáticos.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada por Silva e Almeida (2011, p. 647), considerando o ensino de Física Quântica, em especial:

[...] há certo consenso na questão de que só faz sentido levar a FQ [física quântica] para o EM [Ensino Médio] se for privilegiado seu caráter qualitativo, conceitual, filosófico, cultural, em detrimento de um enfoque excessivamente matemático. Dentro dessa perspectiva, destaca-se o uso de textos de divulgação científica, de textos originais de cientistas, de simulações computacionais e de experimentos de pensamento. Essas estratégias, além de atuarem em prol da construção conceitual

e cultural, poderiam, também, possibilitar a compreensão da maneira humana como a Ciência é construída, evidenciando que, nela, são criados modelos tentando explicar a realidade.

Na busca por caminhos que possibilitem o ensino de Física Moderna no Ensino Médio, elaboramos situações didáticas visando analisar, à luz da Teoria dos Campos Conceituais, a compreensão do efeito fotoelétrico por alunos da terceira série do Ensino Médio.

Nesse sentido, o presente estudo busca identificar quais os invariantes operatórios são mobilizados por alunos da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico em situações didáticas.

A Teoria dos Campos Conceituais

A Teoria dos Campos Conceituais, proposta por Gérard Vergnaud, é considerada uma teoria cognitivista que serve como instrumento para analisar atividades de intervenção didática, pois fornece um referencial muito rico para compreender, explicar e investigar alguns aspectos do processo de aprendizagem (MOREIRA, 2002; VERGNAUD, 1993).

De acordo com Vergnaud (1982, 1993), os conhecimentos estão organizados em *campos conceituais*, apropriados pelos sujeitos com o decorrer do tempo. Vergnaud (1982, p. 36, grifo do autor, tradução nossa) considera um campo conceitual como um “[...] conjunto de situações, cujo domínio requer uma variedade de conceitos, procedimentos e representações simbólicas bem conectados uns com os outros”. Desse modo, um campo conceitual abrange um conjunto de conceitos inter-relacionados, que formam um sistema “[...] e que se referem a uma diversidade organizada de situações, decorrente da atividade do sujeito nessas situações” (VERGNAUD, 2013, p. 51, tradução nossa).

Nessa perspectiva, em Física, os campos conceituais são compostos por modelos e teorias que buscam explicar e interpretar a realidade sendo, portanto, aproximações do real (GRECA; MOREIRA, 2002). Sob essa ótica, a Mecânica, a Eletricidade, a Termologia, a Relatividade e a Mecânica Quântica constituem campos conceituais, “[...] que não podem ser ensinados, de imediato, nem como sistemas de conceitos nem como conceitos isolados” (MOREIRA, 2002, p. 8).

Na Teoria dos Campos Conceituais, o conceito é definido como um triplete S, I, R (VERGNAUD, 1982, 1993):

Ensino & Pesquisa, União da Vitória, v. 20, n.1, p. 101-118, jan./abr., 2022.

- S: é o conjunto de situações, que dão significado ao conceito;
- I: refere-se ao conjunto de invariantes operatórios que constituem o conceito (operacionalidade dos esquemas).
- R: é o conjunto de representações simbólicas (linguagem natural, gráficos, diagramas, etc.) para representar o conceito, suas propriedades e situações.

Desse modo, para analisar um conceito e desenvolver ações que promovam sua aprendizagem, é necessário levar em consideração esses três conjuntos, concomitantemente (MOREIRA, 2002).

O desenvolvimento cognitivo consiste no desenvolvimento de um vasto repertório de esquemas (VERGNAUD, 1996). Vergnaud (2007, 2012, 2013) considera que um esquema é necessariamente composto por quatro categorias:

- Metas e antecipações: “[...] um esquema se dirige sempre a uma classe de situações nas quais o sujeito pode descobrir uma possível finalidade de sua atividade e, eventualmente, submetas; pode também esperar certos efeitos ou certos eventos” (MOREIRA, 2002, p. 12);

- Regras para gerar ação, informação e controle: “[...] regras de ação do tipo ‘se ... então’ que constituem a parte verdadeiramente geradora do esquema, aquela que permite a geração e a continuidade da sequência de ações do sujeito [...]” (MOREIRA, 2002, p. 12);

- Invariantes operatórios (conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação): consistem nos conhecimentos contidos nos esquemas, de modo que “[...] constituem a base conceitual, implícita ou explícita, que permite obter a informação pertinente e, a partir dela e da meta a atingir, inferir as regras de ação mais pertinentes para abordar uma situação” (MOREIRA, 2002, p. 13).

- A possibilidade de inferências: a partir das informações e dos invariantes operatórios que o sujeito dispõe, é possível “[...] ‘calcular’, ‘aqui e agora’, as regras e antecipações [...]” (MOREIRA, 2002, p. 12). Desse modo, toda a atividade que envolve as outras três categorias requer cálculos “aqui e imediatamente” em situação (MOREIRA, 2002).

Os invariantes operatórios são os componentes essenciais de um esquema (VERGNAUD, 1998, 2012, 2013). Eles podem ser divididos em duas classes: os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação, que consistem nos conhecimentos contidos nos esquemas. De acordo com Vergnaud (1996, p. 202, grifo do autor, tradução nossa):

Um teorema-em-ação é uma proposição considerada como verdadeira sobre o real; um conceito-em-ação é uma categoria de pensamento considerada como pertinente. Assim, em um exemplo de proporcionalidade [...], $f(\lambda x) = \lambda f(x)$ é um

Ensino & Pesquisa, União da Vitória, v. 20, n.1, p. 101-118, jan./abr., 2022.

teorema-em-ação e, o fator λ é um conceito-em-ação” (VERGNAUD, 1996, p. 202, grifo do autor, tradução nossa).

Dessa forma, os conceitos-em-ação são os conceitos pertinentes dentro da ação nas situações. Consistem nos objetos, predicados ou categorias de pensamento tidas como pertinentes (VERGNAUD, 1996, 2013).

Considera-se os teoremas-em-ação como proposições sobre o real, sustentados como verdadeiras pelos sujeitos. Por conseguinte, esses são utilizados de modo espontâneo durante as situações, o que não significa que estarão necessariamente corretos do ponto de vista científico ou dos conhecimentos culturalmente aceitos (VERGNAUD, 1996, 2012, 2013).

Nessa compreensão, deve-se considerar que “[...] os teoremas são proposições, enquanto os conceitos não são. As proposições podem ser verdadeiras ou falsas, enquanto os conceitos (objetos ou predicados) não são verdadeiros ou falsos, mas apenas relevantes ou não relevantes” (VERGNAUD, 2013, p. 47, tradução nossa). Contudo, na maioria das vezes, os conceitos e os teoremas permanecem implícitos, quiçá, inconscientes. Vergnaud (1982, 2013) considera que não há conceitos sem teoremas-em-ação assim como não existe teoremas sem conceitos-em-ação, sendo, portanto, uma relação dialética e indissociável.

Percurso metodológico

Este trabalho apresenta os resultados parciais de uma pesquisa de doutorado, cuja finalidade é identificar os invariantes operatórios manifestados por estudantes da terceira série do Ensino Médio sobre a dualidade onda-partícula.

Nesse recorte, nosso objetivo é identificar quais os invariantes operatórios são mobilizados por alunos da terceira série do Ensino Médio sobre o efeito fotoelétrico em situações didáticas. Para isso, selecionamos três questões, aplicadas ao longo de uma atividade didática, nas quais abordamos sobre o efeito fotoelétrico.

O percurso metodológico adotado neste trabalho insere-se no campo de pesquisa de cunho qualitativo, em virtude de nosso problema de pesquisa, buscando aprofundar nos significados e na compreensão dos invariantes operatórios, em consonância com os pressupostos teóricos definidos por Bogdan e Biklen (1994) e Flick (2009, 2013).

A aplicação deste estudo ocorreu em um colégio particular da cidade de Nova Esperança, localizada no noroeste do Paraná, no último trimestre de 2019. Como sujeitos da

pesquisa, participaram quarenta e três alunos da terceira série do Ensino Médio. A maioria dos participantes eram do sexo feminino (29 estudantes) e apenas 14 eram do sexo masculino. O grupo era constituído de adolescentes da faixa etária de 16 a 18 anos.

Com base em nossos objetivos de pesquisa, para a constituição dos dados realizamos uma observação participante, sendo a pesquisadora a aplicar a sequência didática. Como instrumento de coleta de dados optamos, nesse momento, pela aplicação de questionários com questões abertas.

A fim de garantir o anonimato dos educandos participantes, cada aluno foi codificado pela letra A seguida por um número natural, por exemplo: aluno A1, A2... até A43. Portanto, nosso banco de dados consiste questionários e atividades escritas realizadas pelos estudantes.

A pesquisa foi realizada mediante apreciação e aprovação do Comitê Permanente de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (COPEP) da Universidade Estadual de Maringá¹. Ressalta-se que foi preservada a identidade da instituição de ensino, bem como a dos sujeitos participantes, de modo a atender as exigências do Conselho de Ética.

Situações e atividades da investigação

Para nossa análise, selecionamos três questões aplicadas ao longo de uma atividade didática, na qual abordamos sobre o efeito fotoelétrico. A primeira questão a ser analisada e respondida, em grupo, consistiu em:

QUADRO 1 - QUESTÃO 1 (Q.1): APLICADA ANTES DA REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Atividade sobre o eletroscópio de folhas
Q.1: *É possível descarregar o eletroscópio utilizando uma fonte de luz? Justifique fisicamente sua resposta.*

FONTE: Elaborado pelos autores

Esse questionamento foi aplicado em um momento estratégico: após realizarmos a discussão sobre o comportamento da luz na dupla fenda e uma abordagem histórica a respeito da natureza da luz, chegamos a um consenso de que a luz deveria ser uma onda. Nesse momento, propusemos uma atividade experimental para os grupos. Entregamos um eletroscópio de folhas, bexigas, pedaço de cano, flanela e papel para cada um deles e os

¹ Pesquisa aprovada pelo Conselho de Ética em Pesquisa (CEP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), pelo parecer número 3.268.473; e com Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE) número 10626119.3.0000.0104.

desafiamos: “*Sem movimentar ou tocar no eletroscópio, o desafio é movimentar as folhas de alumínio*”.

Rapidamente os alunos começaram a testar algumas hipóteses e, lembrando algumas das discussões já realizadas sobre os processos de eletrização, atritaram a bexiga no cabelo e aproximaram/encostaram na placa metálica. Pedimos para que escrevessem as estratégias utilizadas e explicassem fisicamente o que havia ocorrido. Nosso objetivo era retomar os processos de eletrização e avaliar se eles compreendiam o que ocorria para as folhas de alumínio se repelirem.

Na sequência, questionamos-os: “*supondo que as duas folhas de alumínio ficaram eletrizadas negativamente. Descreva uma possível forma de descarregar o eletroscópio após o processo de eletrização*”. Pedimos para que os alunos testassem suas hipóteses e a descrevessem, explicando fisicamente o fenômeno.

Após os grupos analisarem as possíveis formas de descarregar o eletroscópio, propusemos a Questão 1 (Quadro 1), visando utilizar o experimento do eletroscópio de folhas com o objetivo de introduzir as discussões sobre o efeito fotoelétrico. Como já era esperado, a maioria dos estudantes responderam que não seria possível descarregá-lo utilizando uma fonte de luz.

Para testarem suas hipóteses, solicitamos que realizassem novamente o experimento do eletroscópio, tentando descarregá-lo com a lanterna do celular e buscassem explicar fisicamente o que aconteceu ao incidir a luz na placa do eletroscópio.

Fornecemos luzes de LED coloridos (verde, vermelho e azul) com o intuito de testar se o eletroscópio descarregaria com qualquer um dos lufuzes de LED e instigar os educandos a pensar sobre o efeito fotoelétrico. Nesse momento, propusemos um segunda questão (Q2):

QUADRO 2 - QUESTÃO 2 (Q.2): APLICADA APÓS A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Atividade sobre o eletroscópio de folhas

Q.2: *É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz? Justifique fisicamente sua resposta.*

FONTE: Elaborado pelos autores

Vale ressaltar que as questões 1 e 2 (Quadros 1 e 2) foram discutidas nos grupos ao longo da experimentação e entregues, de forma escrita, individualmente. Após a aplicação dessas atividades, para conceituar formalmente efeito fotoelétrico, apresentamos um vídeo

da Univesp - USP² sobre o efeito fotoelétrico, tendo em vista que alguns grupos demonstraram uma certa dificuldade em perceber a luz descarregando as folhas de alumínio do eletroscópio. Isso se deve, em parte, a algumas limitações do experimento realizado em sala de aula, que também foram temas de discussão.

Nosso propósito foi examinar, juntamente com os alunos: “*como é possível a luz descarregar um eletroscópio? Como uma “onda” pode interagir com matéria (no caso com os elétrons)?*”.

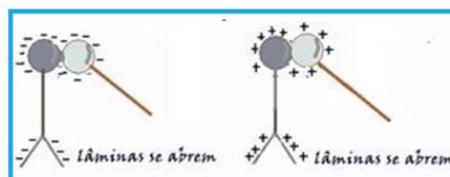
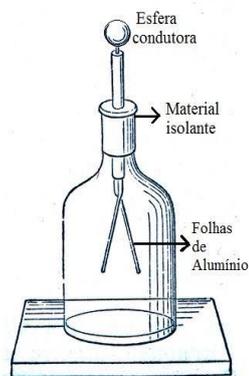
Apresentamos o contexto histórico e a explicação fornecida por Einstein para o efeito fotoelétrico e finalizamos nossas discussões utilizando um simulador, visando analisar a relação entre a frequência e a intensidade da luz no fenômeno.

A terceira questão (Quadro 3) foi realizada, de modo individual, com o intuito de avaliar qual foi a compreensão dos alunos após a conceituação do efeito fotoelétrico.

QUADRO 3 – QUESTÃO 3 APLICADA APÓS A DISCUSSÃO SOBRE EFEITO FOTOELÉTRICO

Eletroscópio de folhas e efeito fotoelétrico

Q.3: O eletroscópio de folhas é um instrumento que permite verificar se um corpo está eletrizado ou não. Quando o eletroscópio está neutro, as folhas de alumínio (lâminas) permanecem fechadas. Se aproximarmos um corpo eletrizado com carga de qualquer sinal, mesmo sem encostar, as lâminas se abrem, pois, o corpo eletrizado provoca uma indução de cargas.



Fonte: <http://fisicaevestibular.com.br/novo/eletricidade/elestatica/carga-eletrica-e-processos-de-eletrizacao/>
<https://educador.brasilecola.uol.com.br/estrategias-ensino/aula-pratica-construcao-um-eletroscopio-folhas.htm>

Supondo que a esfera do eletroscópio entre em contato com um corpo eletrizado negativamente, elétrons serão transferidos para a esfera condutora e, conseqüentemente, para as folhas de alumínio (devido ao processo de eletrização por contato). Como as duas folhas de alumínio ficarão eletrizadas com cargas de mesmo sinal (no caso, cargas negativas), elas irão se repelir, provocando um afastamento dessas folhas (que inicialmente encontravam-se encostadas).

Considerando a situação descrita, explique como é possível descarregar o eletroscópio utilizando uma fonte de luz. Justifique fisicamente sua resposta.

FONTE: Elaborado pelos autores

² Vídeo disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VVka6Mp5vyA>

As situações promovidas ao longo dessa atividade promoveram uma participação ativa dos alunos nas discussões durante as experimentações e na conceituação acerca do efeito fotoelétrico. Rompendo com o modelo tradicional, alguns alunos ficaram “incomodados” em alguns momentos, por esperarem as respostas prontas vindas da professora e receberem mais situações, questionamentos e discussões.

Análise dos dados

Cientes de que a Epistemologia da Física é diferente da Epistemologia da Matemática, da Química e da Biologia (BELLINI, 2007; PIAGET, 1979), adotamos o seguinte procedimento prático para identificar os conceitos-em-ação e teoremas-em-ação:

1º) Identificamos qual foi a regra de ação do tipo “se ... então” adotada, analisando a ação cognitiva do aluno (que pode ser expressa oralmente, ou de forma escrita, ou por meio de desenhos e representações, ou ainda, resolução de exercícios, etc.). Em Física, essa regra de ação implica, na maioria das vezes, em uma relação de causalidade (relação de causa e efeito). Por exemplo, para a Questão 1 (Quadro 1), um aluno respondeu:

Não, pois a luz, na qualidade de onda, não transporta elétrons, que são matéria (A23).

Dessa forma, pela regra de ação do tipo “se ... então” ou relação de causalidade (relação de causa e efeito) adotada pelo aluno, inferimos o seguinte teorema-em-ação: *a luz é uma onda e, conseqüentemente, não transporta matéria.*

2º) Uma vez estabelecido o teorema-em-ação, buscamos reconhecer qual o conceito-em-ação que está explicitamente ou implicitamente presente neste teorema. Em Física, um conceito-em-ação pode ser sintetizado em uma afirmação. No exemplo acima citado, podemos inferir que o conceito-em-ação é: *A luz é uma onda.*

Na Questão 2 (Quadro 2), um aluno respondeu:

Não descarregou com nenhuma das luzes, apenas ficou mantido por um pouco mais de tempo a eletrização” (A29).

Nessa resposta não é possível inferir as regras de ação do tipo “se ... então” ou uma relação de causalidade adotada pelo aluno. Nessas situações, consideramos as respostas dessa natureza como *indefinidas*, visto que o teorema-em-ação e, conseqüentemente, o conceito-em-ação não foram passíveis de identificação. Apresentamos, na próxima seção, os possíveis invariantes operatórios mobilizados ao longo dessa atividade didática.

Resultados

Para a Questão 1 (Quadro 1), obtivemos 43 respostas. Os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação apresentados pelos estudantes antes de realizar o experimento (ou mesmo terem discutido sobre o efeito fotoelétrico) estão apresentados no Quadro 4.

QUADRO 4 – INVARIANTES OPERATÓRIOS MOBILIZADOS PELOS ALUNOS NA QUESTÃO 1

Conceitos-em-ação	Teoremas-em-ação	Exemplos das justificativas enunciadas pelos alunos	Ocorrência quanto aos alunos
A luz é uma onda	A luz é uma onda e, conseqüentemente não transporta matéria	“Não, pois a luz, na qualidade de onda, não transporta elétrons, que são matéria” (A23)	16 alunos (37,20%)
A luz não é partícula	A luz não consegue descarregar o eletroscópio, pois não é partícula	“Não, pois precisa de uma partícula para que o eletroscópio seja descarregado, e a luz não é uma partícula” (A21)	4 alunos (9,30%)
	A luz não consegue descarregar o eletroscópio pois é necessário haver contato	“Não, pois para descarregar qualquer corpo precisa haver contato, reestabelecendo o número de prótons e elétrons do corpo” (A1)	1 aluno (2,32%)
	A luz não consegue descarregar o eletroscópio, pois não possui cargas elétricas	“Não é possível pois a luz não tem carga ou seja não é capaz de descarregar o eletroscópio. Durante o experimento a incidência de luz solar e artificial da sala não são capazes de descarregar o eletroscópio” (A39)	8 alunos (18,60%)
Uma luz de alta frequência é capaz de interagir com os elétrons	A luz, se tiver uma alta frequência, consegue descarregar o eletroscópio	“É possível, uma alta frequência de luz consegue retirar elétrons da superfície do metal, descarregando o eletroscópio” (A42)	2 alunos (4,65%)
A luz não é capaz de transportar matéria nem energia	A luz não consegue descarregar o eletroscópio, pois ela não tem massa e nem energia suficientes	“Não, pois a luz não transporta matéria nem energia” (A13)	1 aluno (2,32%)
A luz é capaz de atrair elétrons de uma superfície metálica	A luz consegue descarregar o eletroscópio, pois ela consegue atrair os elétrons de uma superfície metálica	“Sim, pois a luz [...] ira ‘retirar’ para si a carga da placa metálica, pois é a tendência de quando incide uma luz sobre um objeto metálico ele ‘pegar’ os elétrons” (A26)	6 alunos (13,95%)
Indefinido		“Não há suspeitas de que seja possível, porém não possuo conhecimento para afirmar” (A33)	5 alunos (11,63%)

FONTE: Autoria própria

Para a Questão 2 (Quadro 2), obtivemos 29 respostas. Dos 43 alunos, 11 não responderam a atividade – alguns deles faltaram no dia da atividade e uma outra parte desses alunos não “quiseram” responder a questão por não saberem explicar/interpretar o que observaram no experimento. Os invariantes operatórios apresentados pelos estudantes após

Ensino & Pesquisa, União da Vitória, v. 20, n.1, p. 101-118, jan./abr., 2022.

a realização e discussão (em grupos) da atividade experimental estão apresentados no Quadro 5.

QUADRO 5 – INVARIANTES OPERATÓRIOS MOBILIZADOS PELOS ALUNOS NA QUESTÃO 2

Conceitos-em-ação	Teoremas-em-ação	Exemplos das justificativas enunciadas pelos alunos	Ocorrência quanto aos alunos
É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz	É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz, pois quando a luz incide na placa ela provoca um fluxo de elétrons	“Ocorre o efeito fotoelétrico pois quando a luz incide na placa há um fluxo de elétrons” (A5)	4 alunos (9,30%)
	É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz, pois a luz provoca uma agitação nas moléculas da placa, aquecendo-a	“Sim, após realizar o experimento, observamos que as luzes dos celulares tornaram possível o fechamento das folhas de alumínio. Isso porque, ao incidir a luz, as moléculas se agitam, aquecendo a placa, fechando então as folhas” (A17)	4 alunos (9,30%)
	É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz, pois a luz transporta energia	“As folhas de alumínio foram descarregadas após a incidência da luz. Isso acontece devido a propriedade da luz de transportar energia” (A31)	1 aluno (2,32%)
É possível descarregar o eletroscópio dependendo da fonte de luz utilizada	Dependendo da fonte de luz, é possível descarregar o eletroscópio, tendo em vista que algumas fontes de luz descarregaram o eletroscópio e outras não	“Após o experimento, verificamos e concluímos que a cor da luz influencia no efeito fotoelétrico que ocasiona o fechamento das placas, umas mais e outras menos [...]” (A40)	12 alunos (27,90%)
	É possível descarregar o eletroscópio com algumas fontes de luz, pois nem todas as fontes têm a mesma intensidade	“Não, pois cada cor terá uma intensidade, então algumas não irão conseguir descarregar as lâminas devido a intensidade ser menor que as outras” (A41)	2 alunos (4,65%)
Indefinido		“Não descarregou com nenhuma das luzes, apenas ficou mantido por um pouco mais de tempo a eletrização” (A29)	9 alunos (20,93%)
Não respondeu			11 alunos (25,58%)

FONTE: Autoria própria

Na última questão (Quadro 3), 43 alunos responderam, de modo individual, o questionamento. Nosso intuito era identificar as concepções e esquemas que foram

mobilizados após as situações acerca do efeito fotoelétrico. Os invariantes operatórios identificados encontram-se no Quadro 6.

QUADRO 6 – INVARIANTES OPERATÓRIOS MOBILIZADOS PELOS ALUNOS NA QUESTÃO 3

Conceitos-em-ação	Teoremas-em-ação	Exemplos das justificativas enunciadas pelos alunos	Ocorrência quanto aos alunos
A luz, dependendo da frequência, consegue descarregar o eletroscópio	A luz descarrega o eletroscópio se possuir uma frequência de corte (frequência mínima).	<i>“É necessário utilizar uma fonte de luz com a frequência necessária para que cada fóton, ao colidir com um elétron, tenha energia o suficiente para desprende-lo dos átomos de alumínio, através do efeito fotoelétrico” (A5)</i>	15 alunos (35,71%)
	A luz, se tiver uma alta frequência, consegue descarregar o eletroscópio	<i>“Utilizando uma luz com frequência alta, veremos que será arrancado elétrons e consequentemente fechará as folhas de alumínio” (A18)</i>	10 alunos (23,81%)
Uma fonte de luz emite fótons	A luz consegue descarregar o eletroscópio, pois os fótons emitidos pela fonte de luz colidem com os elétrons, independente da frequência da luz	<i>“Pelo efeito fotoelétrico acontece que quando a luz bate na esfera condutora ela transmite fótons, estes ‘puxam’ os elétrons descarregando o eletroscópio, cada pacotinho de fóton (pacote de energia) serve para um elétrons” (A32)</i>	4 alunos (9,52%)
A luz é transportada por fótons	A luz é transportada por fótons, que incidem nos elétrons e fornecem energia para que os elétrons saiam da placa	<i>“Quando a luz incide sobre a placa, ela é transportada por fótons e quando o fóton incide sobre os elétrons, a energia do fóton é passada para o elétron e convertida em energia cinética fazendo com que os elétrons em excesso saiam da placa deixando-a neutra novamente” (A3)</i>	1 aluno (2,38%)
Uma fonte de luz emite radiação eletromagnética	A luz consegue descarregar o eletroscópio, pois as partículas carregadas de um material absorvem a radiação eletromagnética emitida pela fonte de luz	<i>“A luz emite radiação e por conta do efeito fotoelétrico, o meio eletrizado absorve as cargas, ou seja, o efeito fotoelétrico é uma emissão de partículas carregadas de um meio material que absorva radiação eletromagnética (luz visível) [...]” (A16)</i>	4 alunos (9,52%)
Indefinido		<i>“O efeito fotoelétrico consegue retirar elétrons do metal, isso permite que o eletroscópio seja descarregado” (A21)</i>	6 alunos (14,29%)

FONTE: Autoria própria

Análise e discussão dos resultados

De acordo com os invariantes operatórios mobilizados no primeiro questionamento (Quadro 4), percebe-se que a grande maioria dos alunos não acreditava ser possível a luz

descarregar o eletroscópio. Para 37,20% dos alunos, a luz não seria capaz de interagir com os elétrons por ser uma onda e outros 30,22% argumentaram que a luz não é uma partícula (considerando todas as respostas dentro desse conceito-em-ação), não sendo capaz de deslocar outra partícula (o elétron, no caso).

É interessante considerar que, nesse momento, vínhamos de uma longa discussão sobre a natureza da luz, fazendo uma análise dos comportamentos que são considerados ondulatórios e diferenciando-os daqueles que são característicos das partículas. Desse modo, esses invariantes operatórios apresentados evidenciam uma compreensão, por parte dos estudantes, das discussões e situações promovidas anteriormente.

Nessa primeira questão (Q.1) tivemos ainda seis alunos (13,95%) que consideraram que a luz seria capaz de “arrancar” os elétrons das placas metálicas. Outros dois alunos (4,65%) levaram em consideração que, se a luz possuir altas frequências, ela será capaz de descarregar o eletroscópio. Esses dois invariantes se aproximam das definições aceitas pela ciência atual sobre o efeito fotoelétrico, de modo que essas representações sejam devido a alguma pesquisa e/ou estudo prévio realizado por esses estudantes, tendo em vista que até o momento não havíamos apresentado nenhum conceito ou discussão acerca desse fenômeno.

As respostas a Questão 2 (Q.2) apresentaram variados teoremas-em-ação (Quadro 5). Isso nos é de grande relevância pois estando os alunos convencidos de que a luz deveria se comportar como onda, ao visualizar a luz (por meio da lanterna do celular e alguns com luzes de LED) descarregando o eletroscópio, foi perceptível, nas próprias reações dos alunos, a existência de um conflito cognitivo: como é possível uma onda “arrancar” os elétrons (partículas)?

Quatorze alunos (32,55%) compreenderam que isso seria possível conforme a fonte de luz utilizada. Dentre eles, em 27,90% percebe-se uma compreensão da dependência da frequência da luz no efeito fotoelétrico expressada, na maioria das vezes, como uma relação com a “*cor da fonte*”. Os outros 4,65% dos alunos, que utilizaram o mesmo conceito-em-ação, relacionaram o efeito fotoelétrico a intensidade da luz e não a sua frequência.

Todavia, pesquisas demonstram que estudantes de diferentes níveis de escolaridade têm dificuldade em diferenciar frequência da luz (energia dos fótons) e intensidade da luz (fluxo de fótons) ao analisar experimentos relacionados ao efeito fotoelétrico (REIS, 2020). Essa dificuldade pode ser percebida nas respostas por nós obtidas, pois os mesmos argumentam que “*cada cor tem sua intensidade*”.

Um teorema-em-ação apresentado por 9,30% dos alunos considerou que a luz é capaz de descarregar as lâminas de alumínio com qualquer fonte de luz pois, ao incidir luz, ela aquece as folhas de alumínio (provoca uma agitação nas moléculas da placa). Isso demonstra que eles estavam buscando, em seus esquemas já existentes, explicações para o fenômeno. Nesse caso, as representações acerca da agitação molecular, temperatura, dilatação aparecem implícitas nesses invariantes mobilizados.

Identificamos um teorema-em-ação relacionado com a movimentação dos elétrons, no qual 9,30% dos alunos consideraram que a luz é capaz de descarregar o eletroscópio pois a luz provoca um fluxo de elétrons ao incidir sobre a placa. Percebe-se novamente uma tentativa de adequar o fenômeno a seus esquemas já existentes, nesse caso relacionados à eletrodinâmica.

Dentro do mesmo conceito-em-ação, “*É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz*”, um terceiro teorema-em-ação foi mobilizado por 2,32% dos estudantes: “*É possível descarregar o eletroscópio com qualquer fonte de luz, pois a luz transporta energia*”. Essa concepção de efeito fotoelétrico como luz transformada em energia também foi apresentada no trabalho de Reis (2020), ao indagar os alunos sobre como podemos explicar o que é o efeito fotoelétrico.

Na Questão 3 (Quadro 6), ao retomarmos as discussões acerca do eletroscópio e o efeito fotoelétrico, após a análise dessas representações e a abordagem conceitual, percebe-se a mobilização de invariantes operatórios mais próximos dos conhecimentos cientificamente aceitos: 59,52% compreenderam que o efeito fotoelétrico está diretamente relacionado a frequência da onda eletromagnética, apresentando como conceito-em-ação “*A luz, dependendo da frequência, consegue descarregar o eletroscópio*”.

Dentro desse conceito-em-ação, encontramos dois possíveis teoremas-em-ação: 35,71% desses alunos apresentaram como teorema-em-ação a dependência da frequência da luz, argumentando que a luz é capaz de descarregar o eletroscópio se possuir uma frequência de corte (frequência mínima). Alguns citam, inclusive que essa frequência depende do metal utilizado. Outros 23,81% desses alunos ainda permaneceram arraigados ao teorema-em-ação: “*A luz, se tiver uma alta frequência, consegue descarregar o eletroscópio*”. Entretanto, ao analisar essas respostas, temos a impressão que, nesse momento, os alunos referiam-se a existência de uma frequência mínima para ocorrer o efeito fotoelétrico, contudo, não souberam expressar isso corretamente.

Boa parte dos educandos apresentaram o conceito de fóton próximo a concepção científica atual, buscando explicar que a luz é constituída de fótons (concepção de luz como pequenos “pacotes de energia”). Isso evidencia que a forma como abordamos esses conceitos foram profícuas.

Entretanto, 9,52% dos estudantes, apesar de compreenderem que uma fonte de luz emite fótons, não conseguiram relacionar com a dependência direta da frequência para existência do fenômeno, considerando que a luz consegue descarregar o eletroscópio, pois os fótons emitidos pela fonte de luz colidem com os elétrons, independente da frequência da luz emitida pela fonte. A mesma dificuldade foi encontrada em outros quatro alunos (9,52%), que argumentaram que a luz emite radiação eletromagnética, possibilitando que o meio eletrizado absorva essa radiação e ocorra uma emissão das partículas carregadas, contudo, não compreendem a relação desse fenômeno com a frequência da luz. Esses dois invariantes operatórios demonstram um compreensão inadequada ou parcial do fenômeno e, portanto, devem ser melhor discutido nas próximas atividades didáticas a serem elaboradas.

Considerações finais

A identificação dos invariantes operatórios não é algo trivial, de modo que é necessário analisar um conjunto de situações mais amplo, da mesma classe, para ser possível definir uma regularidade nas respostas e se obter afirmações conclusivas (GRINGS; CABALLERO; MOREIRA, 2006). Conforme discute Moreira (2002, p. 16), “[...] conceitos-em-ação e teoremas-em-ação podem, progressivamente, tornarem-se verdadeiros conceitos e teoremas científicos, mas isso pode levar muito tempo”. Portanto, estamos cientes de que os resultados por nós apresentados são apenas uma pequena parte, um início, das discussões sobre os invariantes operatórios que envolvem o campo conceitual do efeito fotoelétrico.

Todavia, considerando os conceitos e teoremas-em-ação mobilizados nas situações didáticas propostas, percebe-se que privilegiando o caráter qualitativo, conceitual e histórico dos conceitos, em especial do efeito fotoelétrico, torna-se profícuo a inserção da Física Quântica, além de propiciar uma compreensão de como a Ciência é construída por meio dos modelos para explicar a realidade, condizente com que é apresentado em Silva e Almeida (2011).

Esperamos que este trabalho contribua para um melhor entendimento dos invariantes operatórios a respeito do efeito fotoelétrico e subsidie caminhos para abordar a Física Moderna, em especial a Física Quântica no Ensino Médio. Compreender os invariantes

mobilizados dentro daquele campo conceitual, auxilia o professor na escolha de situações frutíferas a serem propostas aos alunos e, a escolha dessas situações, dependerá de seu conhecimento sobre a área que deseja abordar e de sua compreensão acerca do desenvolvimento dos alunos, levando em consideração a diversidade da sala de aula (VERGNAUD, 1998, 2012, 2013).

Referências

BELLINI, M. Epistemologia da biologia: para se pensar a iniciação ao ensino das ciências biológicas. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, Brasília, v. 8, n. 218, 2007.

BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Tradução: Maria João Alvarez, Sara Bahia dos Santos e Telmo Mourinho Baptista. Portugal: Porto Editora, 1994.

FLICK, U. **Introdução à pesquisa qualitativa**. Tradução: Joice Elias Costa. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FLICK, U. **Introdução à metodologia de pesquisa: um guia para iniciantes**. Tradução: Magda Lopes. Porto Alegre: Penso, 2013.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Além da Detecção de Modelos Mentais dos Estudantes: uma proposta representacional integradora. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 31-53, 2002. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/568/360>>. Acesso em 20 out. 2020.

GRINGS, E. T. O; CABALLERO, C.; MOREIRA, M. A. Possíveis indicadores de invariantes operatórios apresentados por estudantes em conceitos da Termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 28, n. 4, p. 463-471, 2006. Acesso em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v28n4/a09v28n4.pdf>>. Acesso em: 14 jul. 2019.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o Ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7-29, 2002. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/569/361>>. Acesso em: 06 fev. 2020.

NARDI, R.; MONTEIRO, M. A.; BASTOS FILHO, J. B. Dificuldades dos professores em introduzir a Física Moderna no Ensino Médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. In: NARDI, R. (Org.). **Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores** [online]. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n.1, p. 23-48, 2000. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/600/390>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

PIAGET, J. Los datos genéticos de la epistemología física. In: PIAGET, J. (Org.). **Tratado de lógica y conocimiento científico**, dirigido por Jean Piaget. Vol. IV – Epistemología de la física. Buenos Aires: Editorial Paidós, 1979.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, 1999. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6873/6333>>. Acesso em: 20 set. 2021.

REIS, M. A. F. **Efeito fotoelétrico na produção e transformação da luz**: investigação do uso de uma proposta didática para o ensino de Física em cursos de engenharia. Mafra, Santa Catarina: Ed. da UnC, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unc.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/197/EFEITO_FOTOELETTRICO_Mari_Aurora.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 jan. 2022.

SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. M. Física quântica no Ensino Médio: o que dizem as pesquisas. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 624-652, 2011.

VERGNAUD, G. Cognitive and Developmental Psychology and Research in Mathematics Education: some theoretical and methodological issues. **For the Learning of Mathematics**, Montreal, v. 3, n. 2, p. 31-41, 1982.

VERGNAUD, G. Teoria dos campos conceituais. In: NASSER, L. (Ed.). SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 1., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1993. p. 1-26.

VERGNAUD, G. Algunas ideas fundamentales de Piaget en torno a la didáctica. **Perspectivas**, v. XXVI, n. 1, mar. 1996.

VERGNAUD, G. A Comprehensive Theory of Representation for Mathematics Education. **Journal of Mathematical Behavior**, v. 17, n. 2, p. 167-181, 1998.

VERGNAUD, G. ¿En qué sentido la Teoría de los Campos Conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 285-302, 2007. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/475/277>>. Acesso em: 17 dez. 2020.

VERGNAUD, G. Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 287-304, 2012.

VERGNAUD, G. Conceptual Development and Learning. **Revista Qurriculum**, v. 26, p. 39- 59, mar. 2013.