



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências
Mestrado em Ensino de Ciências



Ronivan Sousa da Silva

A ABORDAGEM DO EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO
MÉDIO:
Contribuições de uma unidade de ensino potencialmente
significativa

Campo Grande – MS

2015



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Instituto de Física
Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências
Mestrado em Ensino de Ciências



Ronivan Sousa da Silva

A ABORDAGEM DO EFEITO FOTOELÉTRICO NO ENSINO
MÉDIO:
Contribuições de uma unidade de ensino potencialmente
significativa

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências.

Orientadora: Prof. Dra. Nádia Cristina Guimarães Errobidart

Campo Grande – MS

2015

No princípio havia trevas sobre a face do abismo,

[...]E disse Deus: Haja luz; e houve luz.

$$\nabla \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \vec{B} = 0$$

$$\nabla_x \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Viu Deus que a luz era boa; e fez separação entre a luz e as trevas.

(Gênesis, 1, 1)

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é bem mais que um trabalho acadêmico. É a materialização de muitas dúvidas, angústias, quebra de verdades absolutas e, por fim, o nascimento de mais incertezas. Desta forma, pode-se dizer que este trabalho me fez ir além dos objetivos imediatos de uma pesquisa científica, mas permitiu-me contemplar e a questionar as reais possibilidades do chamado “novo ensino de física”.

Até aqui, muitas pessoas foram especiais e me ajudaram, principalmente mediante discussões eternas, na difícil tarefa de clarificar os objetivos educacionais da minha realidade escolar atual. Minha gratidão a essas pessoas é imensa e, certamente, ainda que pudesse, não saberia me expressar como elas merecem. Infelizmente, não trato tão bem as palavras como as equações.

Agradeço, em primeiro lugar, a toda a minha família.

À minha amada mãe Maria Aparecida de Souza Silva, meu exemplo de pessoa e de bondade, meu mais persistente incentivo de estudo e minha fonte inesgotável de otimismo. Exemplo de dignidade, simplicidade, honestidade e nobreza. Mãe, nunca, nunca seria o que sou sem você. Sinta-se muito orgulhosa neste momento.

Ao meu amado pai Silvano José da Silva, meu mais valioso amigo. Aquele que sempre esteve à disposição para me ajudar e incentivar. Obrigado por sempre estar preocupado em me mostrar o que era certo e o que era errado. Muito obrigado por respeitar, mesmo que não concordasse, todas as minhas decisões pessoais. Pai, nunca, nunca seria o que sou sem você.

À minha querida irmã Silvana Sousa da Silva, joia rara, inestimável, companheira, carinhosa e determinada. Aquela que sempre me apoiou e torceu pelo meu sucesso. Irmã, nunca, nunca seria o que sou sem você.

Agradeço à minha namorada Isabella Suttini Ferreira, linda, maravilhosa, inteligente, companheira constante na busca por novos conhecimentos. Obrigado por todo seu amor, carinho, incentivo e atenção. Obrigado também por compartilhar comigo todos os momentos felizes e difíceis durante o curso de Mestrado. Isa, te amo!

Agradeço também aos meus inseparáveis amigos: Rodenil; Gustavo; Lucas; Gabriel; Pedro; Danilo; Heloise; Samuel Furquim; Ricardo; Geraldo e José Ulisses. Em especial, gostaria de agradecer ao meu eterno amigo Samuel David por ter me ensinado o valor do perdão. Saudades eternas de você “Foguim”.

Agradeço às pessoas que caminham semanalmente ao meu lado, muitas vezes dividindo meu fardo, amenizando os problemas que encontrei aqui. Obrigado aos meus colegas de profissão: Paulo; Pablo; Luís; Maurílio; Leandro; Anderson; Vinícius; Víctor; Hilda; Carla; Arnaldo e Diogo.

Agradeço enormemente à Prof^a. Dr^a. Nádia Cristina Guimarães Errobidart pela orientação, paciência e pelas suas observações que me guiaram na realização desse trabalho. Mais que um mestrando, conquistou um amigo. Você tem todo meu respeito e admiração. Muito obrigado!

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Adriana Gomes Dickman por ter aceitado ser avaliadora deste trabalho, pelas críticas e pela leitura zelosa.

Também faço um agradecimento especial ao Prof. Dr. Paulo Ricardo Rosa, ácido e único, por suas críticas e por nossas intermináveis discussões sobre ensino de física. Seus conhecimentos foram importantíssimos para a elaboração deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Agradeço a todos professores, colegas e funcionários do Programa Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul pelos ensinamentos e companheirismo.

Agradeço ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul por oferecer as condições necessárias para que eu pudesse ingressar em uma Pós-Graduação.

Por fim, agradeço a Deus por ter criado o Universo e presenteado a humanidade com a mínima possibilidade de buscar explicações para sua criação.

Dedico este trabalho à todas as pessoas que persistiram em me mostrar o quanto minha vida poderia ser diferente se eu estudasse com seriedade.

RESUMO

Muitas são as discussões na área de Ensino de Ciências sobre a importância da inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio e possíveis estratégias metodológicas para sua abordagem. No entanto, pesquisadores frequentemente têm apontado que existe uma escassez de trabalhos sobre as dificuldades de aprendizagem dos estudantes acerca de tópicos de FMC, bem como pesquisas que relatam propostas testadas em situações reais de ensino com apresentação de resultados de aprendizagem. Diante deste contexto, elaboramos e aplicamos uma unidade de ensino potencialmente significativa, fundamentada na utilização de aspectos de História e Filosofia da Ciência (HFC) e uso de simulação computacional, acerca dos conceitos de físicos presentes no experimento do Efeito Fotoelétrico para alunos de um Curso de Educação Profissional Técnica de Nível Médio Integrado em Edificações do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul (IFMS), Campus Aquidauana. Para estruturar nossa unidade de ensino, utilizamos a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel (2003) como referencial teórico e metodológico. Como referencial de análise de dados, utilizamos a proposta metodológica sugerida por Cardoso e Dickman (2011). Nossos resultados sinalizam a maioria dos sujeitos apresentou um número razoável de indícios de aprendizagem significativa que para os conceitos de energia de um fóton, função trabalho e energia cinética dos fotoelétrons, entretanto, para os conceitos de dualidade onda-partícula, intensidade e frequência de luz, nossa análise indica que poucos sujeitos compreenderam estes conceitos significativamente. A partir das reflexões obtidas de nossa análise, à luz da Taxonomia Revisada de Bloom, foi possível identificar os aspectos positivos e negativos da utilização de aspectos de HFC e da simulação computacional, bem como sugerir mudanças na própria estrutura da unidade de ensino e nos instrumentos utilizados para coleta de dados.

Palavras-Chave: Física Moderna e Contemporânea; Simulação Computacional; História e Filosofia da Ciência

ABSTRACT

There are many discussions in area Science Teaching about the importance of inclusion of topics of Modern and Contemporary Physics (MCP) in high school and possible strategies methodological for its approach. However, researchers often have pointed out that there is a lack of studies about the difficulties of student learning on topics of FMC, as well as research reporting proposals tested in real teaching situations with presentation of learning outcomes. Given this context, we developed and applied a potentially significant teaching unit, based in the use of aspects of History and Philosophy of Science (HPS) and use of computer simulation, about the physical concepts present in the photoelectric effect of the experiment for students of a Course Integrated Professional Education Middle Level Technical Building at the Federal Institute of Mato Grosso do Sul (IFMS), Campus Aquidauana. To structure our teaching unit, we use the Theory of Meaningful Learning (TML) of David Ausubel (2003) as theoretical and methodological reference. As data analysis framework, we use the methodological approach suggested by Cardoso and Dickman (2011). Our results indicate the majority of subjects had a reasonable number of clues of significant learning to the concepts of energy of a photon , work function and kinetic energy of the photoelectron , however, to the concepts of wave-particle duality , intensity and light frequency, our analysis indicates that few subjects understand these concepts significantly. From the reflections obtained from our analysis in the light of the Revised Taxonomy of Bloom, it was possible to identify the positive and negative aspects of using aspects of HPS and computer simulation and suggest changes in the structure of teaching unit and instruments used for data collection .

Keywords: Modern and Contemporary Physics; Computer Simulation; History and Philosophy of Science

LISTA DE FIGURAS

Figura 2 - Mapa conceitual ilustrando o processo de aprendizagem significativa.....	47
<i>Figura 3 - Mapa conceitual para natureza dual da luz</i>	<i>52</i>
Figura 4- Representação dos raios de luz de acordo com o modelo de Pitágoras	61
Figura 5 - Representação do mecanismo da visão de acordo com Leucipo e seus seguidores.....	62
Figura 6- Representação esquemática da Câmera Escura proposta por Alhazen.....	63
Figura 7 - Representação da reflexão da luz segundo o modelo de Newton.....	66
Figura 8 - Decomposição, recomposição e decomposição da luz branca por Isaac Newton ..	66
Figura 9 - Fenômeno denominado birrefringência ocorrendo em um cristal de calcita.....	67
Figura 10 - Esquema ilustrativo do aparato do experimento de Young	69
Figura 12 - (a) Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de luz; (b) Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de fotoelétrons	81
Figura 1- Ilustração da luz irradiada sobre a placa de metal e os fotoelétrons sendo ejetados na simulação computacional do Efeito Fotoelétrico	86
Figura 13 - Representação hierárquica das categorias no Domínio Cognitivo propostas por Bloom et al (1956) para os objetivos educacionais	97
Figura 14- Categorização atual da Taxonomia de Bloom proposta por Anderson, Krathwohl e Airasian (2001)	100
Figura 15 - Tabela Bidimensional de Bloom preenchida com os objetivos educacionais para uma situação hipotética	104
Figura 16 - Mapa conceitualmente construído para que os alunos identificassem os erros conceituais presentes	124
Figura 17 -Resolução de A1 para o exercício proposto na questão 10, classificada como SP	150
Figura 18 - Resolução de A13 para o exercício proposto na questão 10, classificada como SMD	151

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- Distribuição dos artigos selecionados por revistas.....	26
QUADRO 2- Descrição do grupo piloto e do grupo participante da coleta de dados.....	91
QUADRO 4- Estrutura Completa da Taxonomia Original de Bloom et al (1956).....	98
QUADRO 5- Descrição das categorias do Domínio Cognitivo por meio de verbos de ação específicos	98
QUADRO 6- Descrição das categorias e identificação das subcategorias da Dimensão Processos Cognitivos por meio de verbos de ação e gerúndios, respectivamente	100
QUADRO 7 - Descrição das categorias e identificação das subcategorias da Dimensão Conhecimento.....	102
QUADRO 8- Resumo da análise de consistência interna – aplicação da avaliação final de conhecimento ao grupo piloto (Semestre 2014/1, onde N é o número de estudantes).....	139
QUADRO 9 - Cronograma de execução das atividades previstas na unidade de ensino.....	142
QUADRO 10 - Questão 01 e 02 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	143
QUADRO 11 - Questões 03 e 04 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	145
QUADRO 12 - Questões 05a e 05b da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	147
QUADRO 13 - Questões 06 a 08 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	147
QUADRO 14 - Questão 09 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise...	148
QUADRO 15- Questão 10 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise....	150
QUADRO 16 - Questões 11 e 12 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	152
QUADRO 17 - Questão 15 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise...	153
QUADRO 18 - Questões 13 e 14 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise	154
QUADRO 19: Questão 2 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise	160
QUADRO 20: Questões Q03 e Q09 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise	161
QUADRO 21 - Questões Q07 e Q08 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise	164
QUADRO 22- Questão Q10 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise	166
QUADRO 23- Questões Q04 e Q05 (itens 1, 2, 3) e a classificação das respostas de cada sujeito – AFC	167
QUADRO 24 - Questão 05 (item 4) e a classificação das respostas de cada sujeito – AFC .	170
QUADRO 25 - Questão Q05(5) e a classificação das respostas de cada sujeito na AFC.....	171
QUADRO 26 - Síntese da classificação das respostas dos sujeitos da pesquisa para cada novo conceito físico investigado em CS conceito suficiente, CI conceito insuficiente e CA conceito ausente	173
QUADRO 27 - Tabela Bidimensional de Bloom preenchida com a numeração das questões da AFC	177
QUADRO 28 - Classificação das questões de acordo com os novos conceitos, com o tipo de conhecimento e o tipo de processo cognitivo exigido.....	178

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Classificação das respostas dos sujeitos por questão - Avaliação de Diagnóstico Inicial.....	157
Gráfico 2- Frequência da classificação dos subsunçores por sujeito participante do grupo de pesquisa	158
Gráfico 3 - Distribuição das respostas dos sujeitos por questão – Avaliação Final de Conhecimento.....	174
Gráfico 4 - Frequência da classificação dos novos conceitos por sujeito participante do grupo de pesquisa.....	175
Gráfico 5 - Classificação das respostas dos sujeitos da pesquisa por cada novo conceito estudado	179

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADI – Avaliação de Diagnóstico Inicial
AFC – Avaliação Final de Conhecimento
AIP - *American Institute of Physics*
AJP - *American Journal of Physics*
CA – Conceito Ausente
CBEF - Caderno Brasileiro de Ensino de Física
CI – Conceito Insuficiente
CS – Conceito Suficiente
CTSA – Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente
DCNEM – Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
ENEM – Exame Nacional do Ensino Médio
FMC – Física Moderna e Contemporânea
FNE - A Física na Escola
FQ – Física Quântica
HCE - História da Ciência e do Ensino
HFC – História e Filosofia da Ciência
IFMS – Instituto Federal de Educação do Mato Grosso do Sul
LDB – Lei de Diretrizes e Bases
MC – Mapa Conceitual
MEC – Ministério da Educação e Cultura
OA – Objeto de Aprendizagem
PCN+ – Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
PE - *Physics Education*
PhET – *Physics Education Technology*
PNLD – Plano Nacional do Livro Didático
PT - *Photoelectric Tutor*
RBEF - Revista Brasileira de Ensino de Física
SA – Subsunçor Ausente
SE - *Science & Education*
SED – Secretaria de Educação do Estado de Mato Grosso do Sul
SMD – Subsunçor Mal Definido
SP – Subsunçor Presente
TAS – Teoria da Aprendizagem Significativa
TICs – Tecnologias da Informação e Comunicação
TRR – Teoria da Relatividade Restrita

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EFEITO FOTOELÉTRICO	24
1.1.1 Descrição e classificação dos trabalhos a respeito do efeito fotoelétrico.....	26
1.1.1.1 Categoria A – Fundamentação teórica ou conceitual do tema.....	26
1.1.1.2 Categoria B - Descrição de analogias e situações de contextualização do tema	28
1.1.1.3 Categoria C - Aspectos de HFC com relação ao tema	29
1.1.1.4 Categoria D - Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que exploram simulação computacional.....	31
1.1.1.5 Categoria E - Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que exploram HFC	35
1.1.1.6 Categoria F - Análise de livros didáticos ou manuais com respeito ao tema.....	37
1.2 O USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO ENSINO DE FÍSICA	38
1.3 UTILIZANDO HFC NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO	42
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	45
2.1 A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL	45
2.1.1 Condições necessárias para a ocorrência da aprendizagem significativa.....	46
2.1.2 Aprendizagem mecânica <i>versus</i> Aprendizagem significativa	48
2.1.3 Organizadores prévios.....	49
2.1.4 Os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa	50
2.1.5 Organizador explicativo (mapa conceitual)	52
2.1.6 Identificando indícios de aprendizagem significativa	53
2.2 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE AUSUBEL APLICADOS NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO	54
2.2.1 Possíveis contribuições dos elementos de HFC no uso da teoria de Ausubel.....	55
2.2.2 Possíveis contribuições da utilização da simulação computacional no uso da teoria de Ausubel	57
CAPÍTULO 3 - O EFEITO FOTOELÉTRICO	59
3.1 APRESENTANDO O CONCEITO	59
3.2 ASPECTOS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E SEU PROCESSO EVOLUTIVO	60
3.2.1 Os diversos modelos propostos para a natureza da luz	60

3.2.2 O contexto histórico da descoberta do Efeito Fotoelétrico por hertz	71
3.2.3 A explicação de Philip Von Lenard para o Efeito Fotoelétrico.....	74
3.2.4 O modelo corpuscular de Albert Einstein <i>versus</i> o modelo eletromagnético clássico	75
3.2.5 A rejeição da comunidade científica à proposta de Einstein e o experimento de Robert Millikan	77
3.2.6 A explicação do efeito Compton como fator definitivo para aceitação do modelo corpuscular de Albert Einstein pela comunidade científica	79
3.2.7 O conceito de dualidade onda-partícula	80
3.2.8 A Teoria Quântica de Campos – Uma possível resposta muito controversa.....	82
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DA PESQUISA	85
4.1. ESCOLHENDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	85
4.2. CONTEXTO ESCOLAR DA PESQUISA	88
4.2.1 O Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, campus Aquidauana.....	88
4.2.2 A Disciplina de Física nos cursos Técnico em Edificações e Técnico em Informática do IFMS	89
4.3. O GRUPO PILOTO	90
4.4. OS SUJEITOS DA PESQUISA.....	91
4.5. ELABORAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA	92
4.6. METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS CONSTRUÍDOS	95
4.6.1 A Metodologia de Análise de Dados proposta por Cardoso e Dickman (2012)	95
4.6.2 As Taxonomias de Bloom: Original e Revisada	96
CAPÍTULO 5: UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA.....	105
5.1 AVALIAÇÃO DE DIAGNÓSTICO INICIAL - (01 AULA).....	105
5.2 ATIVIDADE DE ENSINO PARA CONSOLIDAÇÃO DE SUBSUNÇORES (02 AULAS) .	108
5.3 OS MODELOS PROPOSTOS PARA NATUREZA DA LUZ ATÉ A ERA PRÉ-FÍSICA QUÂNTICA (01 AULA)	109
5.4 INTERPRETAÇÕES INICIAIS DO EFEITO FOTOELÉTRICO (01 AULA)	111
5.5 ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - 1ª PARTE (01 AULA)	112
5.6 INTERPRETAÇÕES DA FÍSICA CLÁSSICA PARA O EFEITO FOTOELÉTRICO E A PROPOSTA DO MODELO CORPUSCULAR DE ALBERT EINSTEIN PARA A LUZ - (02 AULA)	117
5.7 ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - 2ª PARTE (01 AULA)	118
5.8 RESOLUÇÃO DE EXERCÍCIOS; MAPA CONCEITUAL E A REJEIÇÃO DA COMUNIDADE CIENTÍFICA DAS IDEIAS DE EINSTEIN (01 AULA)	123
5.9 EFEITO COMPTON (1921): A ACEITAÇÃO DA COMUNIDADE CIENTÍFICA DAS IDEIAS DE EINSTEIN E PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIEDADE DE BOHR (01 AULA).....	125

5.10 VERIFICAÇÃO DE APRENDIZAGEM (01 AULA)	126
5.11 TAREFA 01	128
5.12 TAREFA 2	132
[] Os fotoelétrons emitidos com altas energias cinéticas são aqueles que estavam mais fracamente ligados no metal. 5.13 TAREFA 3	133
CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE DADOS	136
6.1 REFLEXÕES SOBRE O GRUPO PILOTO	136
6.1.1 Resultados e análise	137
6.2 A UNIDADE DE ENSINO	141
6.2.1 Análise da avaliação de diagnóstica inicial - ADI	142
6.2.2 Análise da avaliação final de conhecimento – AFC	158
6.2.2.1 Dualidade onda-partícula para luz	159
6.2.2.2 Função trabalho de uma superfície metálica	161
6.2.2.3 Energia de um fóton	163
6.2.2.4 Conservação da Energia	165
6.2.2.5 Intensidade e frequência de luz de acordo com o modelo corpuscular	167
6.2.2.6 Fóton	170
6.2.2.7 Energia cinética dos fotoelétrons	171
6.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS	172
CONSIDERAÇÕES FINAIS	183
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	195

INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 30 anos, têm-se discutido na área de Ensino de Ciências sobre a importância da inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio e possíveis estratégias metodológicas para sua abordagem. Neste intervalo de tempo, um número expressivo de pesquisadores¹ investigou o tema sob diferentes aspectos, tais como: justificativas para inserção; seleção de possíveis tópicos a serem inseridos; processo de formação de professores; elaboração de materiais didáticos; opiniões de professores e alunos; construção de aparatos experimentais; elaboração de aparatos associados ao emprego de tecnologias da informação e comunicação (animações, simulações, vídeos) como ferramentas facilitadoras do processo de ensino; valorização das relações entre o ensino de FMC com aspectos de Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA); possibilidades de contribuição da inclusão de elementos da História e Filosofia da Ciência (HFC) nas aulas; desenvolvimento e aplicação de sequências didáticas em sala de aula, entre outros.

Ao analisar as justificativas apontadas na literatura para inserção de conteúdos de FMC no ensino médio, Silva et al (2013) classificou em quatro grandes categorias os argumentos evidenciados: a) Compreensão das tecnologias atuais; b) Necessidade de atualização curricular; c) A FMC representou uma mudança de paradigma da Física e d) A FMC é um subsídio à compreensão e crítica das questões atuais que envolvem ciência, tecnologia, sociedade e ambiente.

Em suas conclusões, os autores afirmam que a categoria (b) é um argumento que não corresponde mais às necessidades da realidade escolar atual, pois atualmente as escolas brasileiras já englobam em seus documentos a necessidade de inserção de tópicos de FMC. Portanto, a exigida atualização curricular nos primeiros trabalhos acadêmicos já foi, ou está sendo feita em todos os estados brasileiros (SILVA et al, 2013).

Durante o período de construção de justificativas, a linha de pesquisa “Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio” se fundamentou basicamente em argumentos legais para justificar seus projetos de pesquisa. Os principais documentos oficiais em que podemos encontrar orientações ou diretrizes para o ensino de FMC no ensino médio são: A Lei

¹ Veit et al (1987); Terrazan (1992); Valadares e Moreira (1998); Pinto e Zanetic (1999); Ostermann e Moreira (2000); Cavalcante et al (2002); Araújo et al (2001); Brockington e Pietrocola (2005); Pena (2006); Sanches (2006); Oliveira et al (2007); McKagan et al (2008); Ostermann e Pereira (2009); Monteiro et al (2009); Klassen (2009); Gomes (2011); Cardoso e Dickman (2012); Mangili (2012); Silva e Freire Jr (2013).

de Diretrizes e Bases da Educação Nacional - LDB (BRASIL, 1996); as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio – DCNEM (BRASIL, 1996); o Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio - PCN + (BRASIL, 2002) e, finalmente, as Orientações Curriculares para o Ensino Médio (BRASIL, 2002).

A LDB, por exemplo, no seu artigo 35, inciso IV, afirma que “[...] a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina [...]”, deve ser uma das finalidades do ensino médio, devendo, segundo o artigo 36, § 1º, inciso I, esta compreensão deve ser organizada de forma que, após sua conclusão, os alunos demonstrem, entre outros aspectos, o “[...] domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna” (BRASIL, 1996, p. 14).

Nesta mesma perspectiva, as orientações dos PCN + apontam que um cidadão que dispõe de um amplo conhecimento da Física poderá exercer melhor seus direitos, será capaz de interpretar diversos fenômenos naturais e conectá-los com seu cotidiano entenderá os princípios físicos em que se fundamentam vários dispositivos tecnológicos, avaliará com mais critérios a veracidade das informações e, por fim, terá uma maior bagagem cultural e conseqüentemente uma visão de mundo diferenciada.

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre a constituição da matéria, de forma que tenham contato com diferentes materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os conceitos relacionados à Física das Partículas (BRASIL, 2002, p. 70).

Em outras palavras, a nossa sociedade utiliza diariamente e amplamente dispositivos tecnológicos que estão fundamentados em conhecimentos de FMC (sistemas de localização geográfica, sensores fotossensíveis, displays de cristal líquido, laser, fibra ótica, nano chips, computadores). Entretanto, poucos são aqueles que conseguem entender minimamente como funcionam esses dispositivos, “[...] muitos se portam como os nativos diante dos utensílios dos europeus conquistadores” (BROCKINGTON e PIETROCOLA, 2005, p. 10).

Ainda com relação aos PCNs +, na parte destinada especificamente à Física, é sugerido como tema estruturante o tópico “Matéria e Radiação”, composto pelas seguintes unidades temáticas: matéria e suas propriedades; radiações e suas interações; energia nuclear e radioatividade; eletrônica e informática (BRASIL, 2002).

Tais orientações oficiais sinalizam a preocupação em tornar a disciplina de Física significativa para os alunos no momento de seu aprendizado, tendo como expectativa que os alunos possam relacionar no momento de seu aprendizado os novos conteúdos com conhecimentos apreendidos em ocasiões anteriores.

Diante deste contexto de mudança no ensino de física, o Ministério da Educação e Cultura (MEC) ampliou e aprimorou o Plano Nacional do Livro Didático (PNLD), incorporando novas componentes curriculares, além de outros materiais de apoio à prática educativa. Assim, diversos autores de materiais pedagógicos, buscando a aprovação de suas obras por este programa, começaram a expor um número maior de tópicos de FMC e com muito mais intensidade em suas obras.

Essa nova perspectiva foi evidenciada por Domingui (2012) na comparação das obras selecionadas pelo PNLD em 2009 e 2012. Segundo o autor, observa-se expressivas alterações e melhorias no que tange a inserção de conteúdos de FMC, evidenciando uma nova postura dos autores de livros didáticos com relação ao ensino de FMC.

A investigação de Domingui (2012) indicou que os livros didáticos selecionados no PNLD de 2012 abordam os seguintes conteúdos de FMC em comum: Teoria do Big Bang; Teoria da Relatividade Restrita; Mecânica Quântica (radiação do corpo negro, Efeito Fotoelétrico, princípio da incerteza; princípio da complementariedade) e Física Nuclear. O autor também destacou que foi observada uma maior preocupação em facilitar o processo de ensino-aprendizagem de FMC, inserindo um volume maior de conteúdos e estruturando-os de forma equivalente aos demais conhecimentos.

As instituições responsáveis pelo ensino médio no Estado de Mato Grosso do Sul também têm buscado atender as exigências e orientações dos documentos oficiais no que diz respeito à inserção de conteúdos de FMC. Nesse sentido, a Secretaria de Educação do Estado de Mato Grosso do Sul (SED-MS), por meio do Referencial Curricular 2012 para o ensino médio das escolas estaduais, tem a expectativa de que os jovens após a conclusão desta etapa, mesmo aqueles que não venham aprofundar seu conhecimento em Física, tenham adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem. Além disso, observamos neste Referencial Curricular a distribuição dos seguintes tópicos FMC ao longo dos três anos do ensino médio: buracos negros, natureza da luz e partículas elementares.

Já o Instituto Federal de Educação do Mato Grosso do Sul (IFMS), instituição de ensino na qual esta pesquisa foi desenvolvida, os conceitos da Física estão divididos em seis disciplinas

de física ao longo de seis semestres. Evidenciamos nos Projetos Pedagógicos dos Cursos Técnicos, na ementa da disciplina denominada Física 6, dois tópicos de FMC: a Teoria da Relatividade Restrita e Estrutura da Matéria. Esta ementa é a mesma para todos os cursos técnicos da instituição.

O contexto descrito acima evidencia os principais documentos ou argumentos legais direcionados a inserção de FMC no ensino médio no Brasil, no Estado e particularmente na instituição em que realizamos a pesquisa. No entanto, pesquisadores frequentemente têm apontado que existe uma escassez de trabalhos sobre as dificuldades de aprendizagem dos estudantes acerca de tópicos de FMC, bem como pesquisas que relatam propostas testadas em situações reais de ensino com apresentação de resultados de aprendizagem.

Ostermann e Moreira (2000) e Ostermann e Pereira (2009) concluíram que existe uma grande concentração de publicações sobre temas de FMC em forma de divulgação ou como bibliografia de consulta para professores do ensino médio, porém, ainda é pequena a quantidade de trabalhos que investigam os mecanismos envolvidos no processo de construção de conhecimentos relativo a temas de FMC em sala de aula.

Loch e Garcia (2009) ao realizarem uma revisão bibliográfica em periódicos nacionais a partir do ano de 2002, identificaram que haviam apenas treze trabalhos. Destacaram que a maior parte dos trabalhos encontrados se refere a propostas de ensino da Teoria da Relatividade Restrita e da Mecânica Quântica. Quanto à metodologia empregada, observaram que a maioria das propostas se utilizam da História e Filosofia da Ciência, contextualizam as atividades por meio do funcionamento de dispositivos tecnológicos e fazem uso de diversos recursos de mídia durante as aulas.

Jardim et al (2011) realizaram uma pesquisa bibliográfica no Caderno Brasileiro de Ensino de Física e na Revista Brasileira de Ensino de Física, no período de 2000 a 2009, sobre os trabalhos que abordavam que a introdução de temas de FMC nas salas de aula de nível médio. Foram identificados 35 artigos, abordando os conteúdos de Teoria da Relatividade Restrita e Geral, Efeito Fotoelétrico, Radiação, Princípio da Incerteza e Princípio da Complementariedade de Bohr. Analisando a classificação dos trabalhos feita pelos autores, observamos que somente os trabalhos de Caruso e Freitas (2009) e Köhnlein e Peduzzi (2005), ambos sobre Teoria da Relatividade Restrita, lidam explicitamente com o ensino e dificuldades de aprendizagem dos alunos.

Silva e Almeida (2011) fizeram uma revisão dos artigos que tratam do ensino da Física Quântica (FQ) em nível médio em periódicos nacionais e internacionais no período de 1997 a 2009. Identificaram 16 propostas de ensino de FQ. Entretanto, somente três trabalhos dedicaram-se, prioritariamente, em avaliar resultados de aprendizagem das propostas de ensino de FQ aplicadas. Ao final do artigo, os autores ressaltam a necessidade de um maior número de trabalhos que analisem as contribuições e dificuldades de ensinar FQ.

Levando-se em consideração estes resultados encontrados na literatura, propomos elaborar, desenvolver, aplicar e identificar as contribuições de uma unidade de ensino para aprendizagem significativa de conceitos de FQ no ensino médio. Entretanto, nossa escolha por ensinar tópicos de FMC não está fundamentada unicamente em uma revisão de literatura. Em nossa opinião, tópicos de FMC são essenciais para o entendimento de informações expostas pela mídia, tais como notícias sobre novas descobertas a respeito da natureza da luz ou comprovação experimental de alguma partícula subatômica. Além disso, entendemos que a FMC é importante para o exercício da cidadania plena das pessoas, isto é, devemos garantir às pessoas o acesso à cultura científica do século XXI cumprindo a constituição brasileira (Capítulo III, art. 205 ao art. 219).

Em nossa busca por uma definição de qual tópico a ser ensinado, identificamos que um número razoável de pesquisas investiga o ensino do experimento do Efeito Fotoelétrico, principalmente, por meio da utilização de simulação computacional (CARDOSO e DICKMAN, 2012; SOKOLOWSKI, 2013) e alguns outros trabalhos por meio de HFC (KLASSEN, 2009; NIAZ et al, 2010). No entanto, não encontramos trabalhos que tentassem unir estas duas ferramentas de ensino em uma mesma proposta de ensino. Logo, decidimos elaborar e aplicar uma unidade de ensino fundamentada em aspectos de HFC e complementada pelo uso de simulação computacional.

Em nossa opinião, a abordagem histórica da disputa entre modelos físicos fornece um quadro descritivo com várias possibilidades: mostrar aos alunos a construção do conhecimento científico tal como ocorreu na época; trazer à tona a importância da disputa de modelos científicos; destacar a importância da experimentação e da elaboração de hipóteses e previsões para sustentação de um modelo físico e, por fim, evidenciar que o abandono de um modelo científico é extremamente difícil de ser aceito pela comunidade científica. Em suma, esta abordagem permite mostrar os obstáculos pelos quais a Ciência passa durante seu processo de construção.

Diante do exposto, nosso trabalho busca responder a seguinte questão de pesquisa: Quais as contribuições de uma unidade de ensino potencialmente significativa mediada pelo uso de simulação computacional e HFC, para aprendizagem significativa do Efeito Fotoelétrico pelos alunos do 6º Período do Curso de Educação Profissional Técnica de Nível Médio Integrado em Edificações do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul - IFMS, Campus Aquidauana?

Para respondê-la, foi investigada a ocorrência da aprendizagem significativa dos seguintes conceitos físicos: fóton, energia de um fóton, função trabalho, energia cinética do fotoelétron, conservação da energia, dualidade onda-partícula para luz, intensidade e frequência de luz de acordo com o modelo corpuscular proposto por Albert Einstein em 1905.

Assim, para a realização desse trabalho, algumas etapas foram programadas. A primeira foi a realização de uma revisão bibliográfica sobre o ensino do Efeito Fotoelétrico no ensino médio, presentes em artigos de periódicos nacionais e internacionais das áreas de ensino e educação, dissertações, teses, projetos e páginas da *internet* que abordam essa questão. O objetivo dessa etapa foi verificar alguns aspectos relevantes para a pesquisa, tais como: as justificativas que os autores trazem para inserção deste conteúdo; as questões metodológicas e epistemológicas pertinentes; as diferentes propostas de abordagem do fenômeno e, também, verificar quais propostas já foram testadas e os resultados alcançados. Também buscamos identificar na literatura as contribuições das simulações computacionais e da HFC para o ensino de física moderna. Essas revisões estão apresentadas no capítulo 1.

Utilizamos a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (2003) como referencial teórico, metodológico e de análise dos dados construídos. Entendemos que esse referencial possibilitou uma dimensão cognitiva que nos orientou na elaboração de um material potencialmente significativo, na organização sequencial da apresentação das novas informações aos alunos e na verificação de indícios aprendizagem significativa dos conceitos físicos. A fundamentação teórica da TAS, bem como as potencialidades da simulação computacional e da HFC para execução dos princípios da TAS estão apresentadas no capítulo 2.

Também fizemos uma pesquisa por artigos científicos, dissertações e teses sobre a descoberta e explicação do experimento do Efeito Fotoelétrico. Tal busca nos possibilitou a entender o contexto histórico e os dilemas vivenciados pelos cientistas no início do século XX. A contextualização história desde os primeiros modelos propostos para a natureza da luz até a

concepção aceita atualmente pela comunidade científica está descrita no capítulo 3. Este texto histórico é o primeiro produto desta dissertação.

No capítulo 4 encontra-se descrito os aspectos metodológicos de nossa pesquisa. Primeiramente, tem-se uma breve descrição do contexto escolar desta pesquisa, destacando aspectos como o perfil desejado para o egresso e população participante. Em seguida, descrevemos os sujeitos da pesquisa, isto é, o grupo piloto e o grupo da pesquisa. Logo após, relatamos a elaboração e estruturação de nossa unidade de ensino potencialmente significativa desenvolvida em 12 aulas. Por fim, neste capítulo também são descritas as metodologias de aplicação e de análise de dados.

No capítulo 5, apresentamos os materiais pedagógicos elaborados para compor nossa unidade de ensino potencialmente significativa: avaliação de diagnóstico inicial, roteiro para utilização da simulação computacional, textos, questões para verificação de indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos de FQ. Descrevemos detalhadamente todos os planos de aula e como lançamos mão de diversas ferramentas de ensino, tais como: animação e simulação computacional; aspectos de História e Filosofia da Ciência, descrição de aparatos tecnológicos para contextualização, leitura de textos, aula expositiva dialogada, apresentação de seminários pelos alunos. Também procuramos evidenciar de que maneira tal estruturação e ação estão fundamentadas na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel (2003).

No capítulo 6 são descritos os resultados encontrados em nossa pesquisa. Primeiramente descrevemos as principais reflexões obtidas a partir dos resultados junto ao grupo piloto. Em seguida apresentamos os resultados construídos durante aplicação de nosso trabalho junto ao grupo pesquisa, neste momento são analisadas as respostas dos alunos durante a avaliação de diagnóstico inicial e avaliação final de conhecimento. Por fim, sintetizamos nossos resultados e avaliamos os resultados e a avaliação final de conhecimento à luz da taxonomia de Bloom revisada.

E, por último, respondemos nossa questão de pesquisa destacando as principais conclusões obtidas nesta investigação.

CAPÍTULO 1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo buscamos descrever e categorizar trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais da área de ensino e educação que discutem a abordagem do Efeito Fotoelétrico no ensino médio, na forma de discussões teóricas ou a partir de proposições de sequências didáticas, a partir do trabalho de Ostermann e Moreira (2000) até o ano de 2014. Também apresentamos outras duas revisões, a primeira relacionada ao uso de simulações computacionais e a outra acerca das potencialidades de utilização da História e Filosofia da Ciência (HFC) em nossa proposta.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA EFEITO FOTOELÉTRICO

Inicialmente adotamos como recorte para nossa investigação os trabalhos publicados por Ostermann e Moreira (2000) e Ostermann e Pereira (2009). Particularmente com relação ao Efeito Fotoelétrico, no período compreendido entre 1987 a 2006, os autores identificaram estudos que abordavam as justificativas para sua inserção no ensino médio; análises de livros didáticos; tutoriais para construção de aparatos experimentais para laboratórios universitários; textos abordando aspectos teóricos e conceituais do fenômeno. No entanto, apontaram que haviam pouquíssimos trabalhos que relatavam propostas testadas em sala de aula.

Com o objetivo de ampliarmos estas revisões bibliográficas, seguimos os procedimentos de pesquisas bibliográficas sugeridos por Rosa (2013) como norteadores. Destacamos que esta metodologia é diferente daquela utilizada por Ostermann e Pereira (2009), pois os autores não fizeram previamente uma seleção de palavras-chave, optando por ler todos os artigos publicados nos periódicos. Nossa metodologia, com relação à definição do escopo de pesquisa, também difere da utilizada no trabalho de Ostermann e Moreira (2000), pois os autores utilizaram artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela *internet*, enquanto que nós restringimos nossas buscas apenas a periódicos nacionais e internacionais na área de ensino de física.

Levando-se em consideração estes apontamentos, Rosa (2013) sugere os seguintes passos para uma revisão bibliográfica: i) definição de dez a 20 palavras-chave; ii) definição do escopo; iii) seleção do corpus e iv) análise.

Assim, definimos as seguintes palavras-chave: Efeito Fotoelétrico; natureza da luz; fóton; simulações computacionais de FMC; ensino de Mecânica Quântica (MQ); ensino de Física Quântica (FQ); Einstein; Hertz; quantum; analogias FMC e contextualização de FMC.

Dentre as palavras-chave escolhidas, as que resultaram em maior número de trabalhos foram: Efeito Fotoelétrico; natureza da luz; fóton; simulações computacionais de FMC e Einstein.

No intuito fazer uma análise evolutiva fidedigna das publicações ao longo dos últimos anos, tomamos como fonte de busca os mesmos periódicos nos quais Ostermann e Moreira (2000) e Ostermann e Pereira (2009) identificaram trabalhos referentes ao ensino do Efeito Fotoelétrico, a saber (as siglas entre parênteses dizem respeito às abreviaturas que serão usadas no Quadro 1): Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF); Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF); A Física na Escola (FNE); História da Ciência e do Ensino (HCE); Physics Education (PE); Science & Education (SE); American Journal of Physics (AJP).

Para a sistematização das informações utilizamos o mecanismo de busca do próprio periódico. Selecionamos os artigos em que havia a ocorrência de pelo menos uma das 12 palavras-chaves em seus resumos. Nos casos em que houveram dúvidas sobre o enfoque do trabalho, foram feitas leituras flutuantes para identificar se o trabalho abordava o ensino do Efeito Fotoelétrico no ensino médio.

No entanto, a partir das primeiras leituras, notamos que havia um número muito grande de inter-relações do tema (Efeito Fotoelétrico) com outros, como por exemplo, reforma curricular, novo ensino médio, dualidade onda-partícula, entre outros. Este fato exigiu que nós adotássemos algum critério para seleção dos trabalhos a serem lidos na íntegra. Portanto, decidimos separar os trabalhos de acordo com o enfoque adotado pelos autores. Estes enfoques foram posteriormente utilizados como categorias de classificação para os trabalhos analisados: (A) Fundamentação teórica e conceitual do tema; (B) Descrição de analogias e situações de contextualização do tema; (C) Aspectos de HFC com relação ao tema; (D) Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que envolvessem simulação computacional; (E) Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que envolvessem HFC e (F) Análise de livros didáticos ou manuais com respeito ao tema.

Destacamos que, apesar das contribuições dos trabalhos que tratavam exclusivamente da construção e/ou utilização de aparatos experimentais para a inserção de FMC no ensino

médio, eles foram descartados nessa seleção, pois consideramos que não estabelecem relação direta com a nossa proposta.

No total, foram selecionados 33 artigos. O quadro 1 traz a distribuição desses trabalhos por periódicos em ordem crescente de datas de publicação.

QUADRO 1- Distribuição dos artigos selecionados por revistas

PERIÓDICOS	Nº DE ARTIGOS	ARTIGOS
CBEF	06	Veit et al (1987); Valadares e Moreira (1998); Pinto e Zanetic (1999); Dionísio (2005); Coelho e Borges (2010); Cardoso e Dickman (2012)
RBEF	04	Gomes et al (1996); Heckler et al (2007); Sales et al (2008); Alemany et al (2013)
FNE	06	Medeiros (2005); Moreira (2005); Cavalcante et al (2002); Alves e Silva (2008); Silva e Martins (2009); Neto et al (2010)
HCE	01	Mangili (2012)
PE	07	Jones (1991); Williams (2004); Whalley (2005); Kovačević e Djordjevich (2006); Oon e Subramaniam (2009a, 2009b); Sokolowski (2013)
SE	05	Kragh (1992); Stuewer (2006); Klassen (2009); Niaz et al (2010); Klassen et al (2011)
AJP	04	Steinberg et al (1996); Oberem e Steinberg (1999); McKagan et al (2009); De Leone e Oberem (2003)
TOTAL	33	

Podemos observar no Quadro 1 que dos 33 artigos selecionados, 20 são nacionais e 13 internacionais. A maioria foi publicada nas revistas Caderno Brasileiro de Ensino de Física (CBEF), A Física na Escola (FNE) e Physics Education (PE).

Após a leitura na íntegra destes trabalhos, observamos a escassez de trabalhos nacionais no que diz respeito aos aspectos HFC associados ao Efeito Fotoelétrico ou análise de livros didáticos brasileiros com esta perspectiva. Em nossa busca encontramos apenas um único trabalho envolvendo HFC (MANGILI, 2012), enquanto que não foi identificar trabalhos que analisassem a maneira pela qual os livros didáticos abordam a HFC do Efeito Fotoelétrico. Apresentamos abaixo uma descrição/discussão dos artigos selecionados de acordo com as categorias definidas anteriormente.

1.1.1 Descrição e classificação dos trabalhos a respeito do efeito fotoelétrico

1.1.1.1 Categoria A – Fundamentação teórica ou conceitual do tema

Analisando o ensino de FMC, na Inglaterra, em um curso Nível A (curso extra oferecido para alunos acima de 16 anos como forma de preparação para admissão em universidades) e na

universidade, Jones (1991) critica a ênfase que é dada ao Efeito Fotoelétrico e à velha Mecânica Quântica. O autor questiona a abordagem estritamente histórica com que os temas são abordados, processo este que, segundo ele, em outras áreas, não é tão explicitamente observado.

Para Jones (1991), o Efeito Fotoelétrico, apesar de ser considerado o núcleo central da introdução da FMC, parece ser apenas uma das consequências da análise de Einstein sobre a interação da matéria e o campo de radiação. Segundo o autor, o experimento do Efeito Fotoelétrico não é a pedra angular da Mecânica Quântica e, portanto, construir o ensino “em cima” do conceito de fóton não é somente uma grande simplificação, mas também uma imagem falsa que pode ficar nas mentes dos estudantes. Para ele, a verdadeira pedra angular deveria ser o “Princípio da Incerteza de Heisenberg”, pois este de fato seria um novo conceito para os alunos acostumados com ensino da Física Clássica.

Dionísio (2005) analisa o artigo intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz”, publicado por Albert Einstein em 1905. O autor pontua seu entendimento sobre como Einstein propôs, para o problema da radiação de corpo negro, uma solução diferente e independente da apresentada por Max Planck, cinco anos antes. Por fim, o autor sugere que os professores dos cursos de física moderna e autores de livros didáticos passem a usar a regra de Stokes, e não mais o Efeito Fotoelétrico, como o primeiro exemplo ilustrativo e a primeira evidência experimental da existência dos fótons, tal como fez o próprio Einstein em seu artigo original.

Medeiros (2005) relata um bate-papo fictício com Albert Einstein, num volume especial da revista que apresenta uma série de entrevistas com celebridades da Física. Neste texto, destinado a professores e alunos de ensino médio, o autor aborda os mistérios que assombravam a Física Clássica ao final do século XIX, período do nascimento da Física Quântica. A ideia central do texto é mostrar que estes mistérios advinham dos estudos envolvidos na radiação eletromagnética, isto é, com relação à sua natureza, propagação e interação com a matéria. Devido à amplitude do tema, o autor opta por não discutir neste texto como o problema da propagação da radiação levou ao nascimento da Teoria da Relatividade Restrita.

Moreira (2005) relata como o jovem Albert Einstein, trabalhando como técnico de 3ª classe em um escritório de patentes, em Berna (Suíça), publicou cinco trabalhos extremamente relevantes para história da Física. Nos dois primeiros mostrariam como poderia ser demonstrada experimentalmente a realidade física dos átomos e moléculas, assunto que no início do século XX ainda era controverso. No terceiro artigo, Einstein propõe a ideia revolucionária de que a

luz, sob certos aspectos, apresenta natureza corpuscular. E nos dois últimos, Einstein discute os postulados da Teoria da Relatividade Restrita, refutando o caráter absoluto atribuído, durante séculos, ao tempo e ao espaço.

Em síntese, os trabalhos classificados nessa categoria contribuíram com nossa proposta no sentido de fornecer informações que minimizassem, ou até mesmo evitassem, a ocorrência de concepções errôneas ou “mitos” durante a produção/planejamento/aplicação de nossa unidade de ensino. Por exemplo, anteriormente acreditávamos que o artigo de Einstein de 1905 foi primeiramente sobre a tentativa de explicar o Efeito Fotoelétrico, quando na verdade tratava-se da proposta revolucionária da quantização do campo eletromagnético que poderia explicar vários fenômenos, em especial, também o Efeito Fotoelétrico.

1.1.1.2 Categoria B - Descrição de analogias e situações de contextualização do tema

Com o objetivo de promover a contextualização dos conteúdos de Física no ensino médio, Valadares e Moreira (1998) apresentam sugestões conceituais e práticas de como abordar tópicos de FMC a partir de algumas aplicações tecnológicas presentes no cotidiano dos estudantes, tais como o funcionamento de: dispositivos automáticos (portas de elevadores e esteiras de supermercados); sistemas de iluminação pública; fibras óticas; leitores de código de barras e LDR (resistor dependente da intensidade luminosa).

Williams (2004) propõe uma analogia (uma brincadeira ou jogo com viés lúdico) a ser realizada pelos alunos durante a apresentação do conceito de função trabalho de um metal. O autor busca com isso reduzir o grau de abstração dos conceitos estudados no experimento do Efeito Fotoelétrico e fornecer uma estratégia de ensino que permita ao professor se afastar de uma descrição puramente teórica.

Whalley (2005) também propõe uma analogia para facilitar a aprendizagem do Efeito Fotoelétrico. Ele sugere pensar a função trabalho como a energia que um jogador precisa usar para fazer uma bola atravessar uma trave de um jogo de rugby. A energia do fóton, seria a energia usada pelo jogador. O autor exemplifica sua analogia, destacando o fato de que 500 crianças (fótons de baixa energia) provavelmente nunca iriam obter êxito em sua jogada.

Kovačević e Djordjević (2006) apresentaram uma analogia mecânica para o Efeito Fotoelétrico, assunto presente no currículo do último ano do ensino básico das escolas de Sérvia

e Montenegro. Preocupados com o ensino desse tema, os autores propuseram um sistema de bolas rígidas e coloridas (onde cada cor corresponde a uma frequência do espectro luminoso) que deslizam sem atrito sobre uma rampa e colidem com outra bola rígida, lançando-a para fora do sistema. A energia inicial de cada fóton, entendido como bolas coloridas, a função trabalho do material foto-emissor e a energia cinética máxima dos fotoelétrons emitidos é analisada em termos de diferença de altura em relação ao ponto mais baixo da rampa.

Alves e Silva (2008) abordam os detalhes do funcionamento das células fotovoltaicas e sugere uma atividade experimental de demonstração que possibilita o professor mostrar a transformação de energia solar em energia elétrica na sala de aula. As discussões sobre o funcionamento das células fotovoltaicas são feitas basicamente sobre a física dos materiais semicondutores, por exemplo, o silício.

Em resumo, os trabalhos classificados nessa categoria contribuíram com nossa proposta no sentido de fornecer subsídios para que o professor pudesse contextualizar por meio de diferentes dispositivos tecnológicos, a abordagem do Efeito Fotoelétrico.

Em segundo lugar, destacamos o papel das analogias a serem utilizadas durante as aulas. Klassen (2009) aponta que a maior dificuldade de aprendizagem das características do Efeito Fotoelétrico é identificada na interpretação da função trabalho na equação de Einstein. Tendo isto em vista, optamos por utilizar durante as aulas a analogia sugerida por Kovačević e Djordjevich (2006), pois entendemos que ela oferece uma riqueza maior de detalhes do que as outras analogias e exemplifica uma situação bem próxima às vivenciadas por nossos alunos durante o estudo da Lei da Conversão da Energia Mecânica.

Além disso, de acordo com o referencial teórico adotado neste trabalho (Teoria da Aprendizagem Significativa), as analogias desempenham o papel de organizadores prévios, os quais são algum tipo de recurso instrucional potencialmente facilitador da aprendizagem significativa, no sentido de servirem de pontes cognitivas entre novos conhecimentos e aqueles já existentes na estrutura cognitiva do aluno.

1.1.1.3 Categoria C - Aspectos de HFC com relação ao tema

Kragh (1992) argumenta que a relação entre Física e História da Física é intrinsecamente problemática, pois as lições a serem aprendidas da história são muitas vezes contraproducentes aos objetivos do ensino de ciências. Baseado na história do Efeito Fotoelétrico, como um caso

de ensino para introdução da teoria quântica, o autor argumenta que o dilema entre a “verdadeira história” e a “utilidade didática” pode ser contornado focando alguns estudos de casos cuidadosamente selecionados.

Stuewer (2006) defende que a apresentação de surpresas históricas em sala de aula poderia constituir uma ou mais unidades de ensino em física ou outros cursos, como formação continuada de professores. Como ilustrações, o autor discute as surpresas históricas sobre o trabalho de Isaac Newton sobre difração, experimento do Efeito Fotoelétrico realizado por Robert A. Millikan, experimentos de espalhamento de raios X de Arthur H. Compton, a descoberta de James Chadwick do nêutron, George Gamow de criação do modelo da gota líquida do núcleo e Lise Meitner e da interpretação de Otto Robert Frisch de fissão nuclear.

Oon e Subramaniam (2009a, 2009b), relatam o desenvolvimento histórico da natureza da luz desde os tempos dos antigos Gregos até os tempos modernos. Segundo os autores, acompanhar o desenvolvimento do pensamento que caracterizou a evolução dos conceitos na física ao longo do tempo permite entender como atualmente compreendemos tais conceitos. Ao longo dos dois trabalhos são destacadas as contribuições dos antigos filósofos Gregos e Árabes, de Isaac Newton, de Christian Huygens, de Thomas Young, de Augustin Fresnel, de James C. Maxwell, de Max Planck, de Albert Einstein e de Louis de Broglie. No final, os autores comentam sobre possíveis implicações destes relatos para o ensino de Física.

Klassen (2009) apresenta em forma de narrativa histórica, cinco episódios chaves da história do Efeito Fotoelétrico considerados como necessários para um retrato preciso e adequado: 1) a descoberta do Efeito Fotoelétrico por Hertz; 2) a caracterização e a explicação inicial do Efeito Fotoelétrico; 3) o artigo revolucionário de Einstein propondo o quantum de luz e a rejeição da comunidade científica à sua ideia de quantização do campo eletromagnético; 4) a verificação experimental de Millikan da equação de Einstein do Efeito Fotoelétrico apesar de não aceitar a ideia de quantum de luz de Einstein e 5) a descrição do Efeito Compton utilizando o conceito de quantum de radiação eletromagnética para decisiva aceitação da ideia revolucionária de Einstein. Segundo o autor, a história intitulada, “O nascimento do conceito do fóton”, foi utilizada/testada quatro vezes com alunos do primeiro do curso de Física sendo bem recebida todas as vezes. Na prática, segundo o autor, esta ferramenta didática é integrada com um método de instrução que inclui demonstrações experimentais, ilustrações, questionários e exemplo de situações nas quais são aplicados os novos conceitos.

Niaz et al (2010) enumeraram seis aspectos essenciais de HFC com relação aos eventos que culminaram na proposta da hipótese de quantização da luz de Einstein e na subsequente controvérsia dentro da comunidade científica. Esses aspectos seriam: 1) A hipótese de disparo de Lenard para explicar o Efeito Fotoelétrico; 2) A hipótese de quantum de luz de Einstein para explicar o Efeito Fotoelétrico; 3) O período de rejeição da comunidade científica a ideia de quantum de luz; 4) A determinação experimental de Millikan da equação de Einstein para Efeito Fotoelétrico e a determinação empírica do valor da constante de Planck; 5) Pré-suposições de Millikan sobre a natureza da luz e 6) Apresentação histórica e sua interpretação dentro de uma perspectiva histórica e filosófica da ciência.

Utilizando estes aspectos como critérios, Niaz et al (2010) analisaram 103 livros universitários de Física Geral. Os resultados obtidos revelaram que estes elementos históricos são amplamente ignorados ou distorcidos na maioria dos livros, com apenas três classificados como “satisfatórios” e nenhum como “excelente”.

Mangili (2012) utiliza o exemplo do Efeito Fotoelétrico para evidenciar alguns nós presentes no estudo da história da Física, mais precisamente nos estudos da História do eletromagnetismo. O autor busca refletir sobre até que ponto poderíamos atribuir a Hertz a descoberta deste efeito. Para isso, ele utiliza várias obras de Hertz que abordam a descoberta do Efeito Fotoelétrico bem como estudos relativos ao empreendimento experimental do início do século XX e trabalhos acerca da sociedade alemã deste período.

Todos trabalhos classificados nessa categoria contribuiriam substancialmente para nossa proposta de ensino, uma vez que buscamos uma complementariedade entre aspectos de HFC e a utilização de simulações computacionais para o ensino de FMC. Nesse sentido, buscamos obter a maior quantidade possível de informações sobre a história que envolve a explicação do Efeito Fotoelétrico para elaborar um relato sem distorções históricas ou conceitualmente errôneo ou descontextualizado.

1.1.1.4 Categoria D - Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que exploram simulação computacional

Veit et al (1987) apresentam um programa-aula via microcomputador para estudantes de ensino médio, no qual realiza-se um confronto entre o modelo corpuscular e o ondulatório para luz. Segundo os autores, o trabalho buscou que os alunos entendessem sequencialmente as

relações entre corrente elétrica e diferença de potencial, entre corrente elétrica e intensidade luminosa, entre a energia cinética máxima dos fotoelétrons e frequência da radiação incidente e, por fim, entre frequência limite e o tipo de material utilizado nas placas. Os autores justificam a utilização do microcomputador no ensino deste tema pontuando à pouca tradição didática da área de FMC, a carência de materiais instrucionais como, por exemplo, textos adequados, bem como a impossibilidade de execução de diversas experiências de FMC em sala de aula.

Steinberg et al (1996) realizaram estudos sobre a aprendizagem do Efeito Fotoelétrico por estudantes universitários e evidenciaram cinco dificuldades específicas que impedem a aprendizagem significativa deste fenômeno, são elas:

1. [...] A crença de que a Lei de Ohm ($U = R \cdot i$) aplica-se ao experimento do Efeito Fotoelétrico [...].
2. A incapacidade dos estudantes diferenciarem intensidade de luz de frequência de luz [...].
3. A crença de que o fóton é um objeto carregado eletricamente [...].
4. A incapacidade dos estudantes de preverem um gráfico $U \times i$ para o experimento do Efeito Fotoelétrico [...].
5. A incapacidade dos estudantes explicarem os resultados experimentais utilizando o modelo corpuscular da luz (STEINBERG et al, 1996, p. 05).

Em resposta a essas dificuldades, Oberem e Steinberg (1999) desenvolveram um tutorial computacional denominado *Photoelectric Tutor* (PT), no qual os próprios estudantes o completariam em cerca de uma hora após a aula tradicional. Os autores afirmaram que o tutorial ajudou os estudantes a terem progressos na previsão dos resultados experimentais quando algum parâmetro é alterado, porém 60% dos estudantes ainda não foram capazes de prever corretamente os resultados experimentais quando a diferença de potencial elétrico na bateria era alterada.

De Leone e Oberem (2003) realizaram posteriormente estudos no qual aplicaram o tutorial PT, desenvolvido por Oberem e Steinberg (1999), confirmando quase todas as dificuldades já apontadas por Steinberg (1996), excetuando a possibilidade do fóton ser um objeto carregado eletricamente. Além disso, os autores identificaram uma sexta dificuldade específica de aprendizagem: “a falta de conhecimentos básicos dos estudantes acerca do modelo ondulatório da luz com os quais o experimento do Efeito Fotoelétrico é contrastado” (OBEREM E STEINBERG, 1999, P. 114).

Outro trabalho nessa mesma linha de pesquisa, McKagan et al (2009) relatam o desenvolvimento ao longo de dois anos de uma reforma curricular sobre o ensino Efeito Fotoelétrico num curso engenharia, na qual inclui a o aperfeiçoamento do tutorial PT, elaborado por Leone e Oberem (2003), aulas interativas com instrução aos pares e resolução problemas conceituais e algébricos.

Ao final da aplicação da proposta, os autores pontuaram que os alunos seriam capazes de: (1) prever corretamente os resultados experimentais para o Efeito Fotoelétrico quando algum parâmetro é alterado e (2) explicar esses resultados utilizando o modelo corpuscular da luz. Os resultados indicaram que 85% dos alunos conseguiram prever corretamente os resultados experimentais quando era alterado algum parâmetro no fenômeno, inclusive a diferença de potencial da bateria, afirmam, entretanto, que muitos estudantes ainda não foram capazes de estabelecer uma conexão lógica clara entre as observações e o modelo corpuscular da luz.

Cardoso e Dickman (2012) elaboraram uma unidade de ensino potencialmente significativa, baseada no uso de simulação computacional para o ensino do Efeito Fotoelétrico, a qual foi aplicada numa turma de terceiro ano do ensino médio. Em uma das atividades proposta na sequência, foi utilizada a simulação do Efeito Fotoelétrico desenvolvida por McKagan et al (2008). Os resultados da pesquisa sinalizam que os alunos obtiveram um índice de acerto acima de 67% na maioria das questões propostas no teste de conhecimento final.

Sokolowski (2013) apresenta a estrutura de um processo de ensino fundamentado na aprendizagem indutiva. Neste processo, utiliza-se um questionário fechado para apresentar aos alunos um problema e, mediante o uso informações auxiliares, estes são guiados do processo de solução. Assim, o autor elaborou e desenvolveu uma unidade de ensino na qual utiliza este tipo de método para ensinar o Efeito Fotoelétrico. As aulas foram ministradas a grupo de 15 alunos do (high-school), o que corresponde ao nosso último ano do ensino médio e uma simulação do experimento do foi utilizada como mediadora para instrução. Como conclusão do trabalho, o autor afirma que por meio das análises das respostas dos alunos sobre a influência da bateria no circuito fotoelétrico, pode-se afirmar as aulas atingiram seus objetivos de aprendizagem.

Heckler et al (2007) relatam o desenvolvimento e a aplicação de um CD-ROM de óptica para o ensino médio. O material contém textos didáticos escritos em linguagem *html*, animações, simulações (Java Applets) e imagens disponíveis na internet. A proposta foi aplicada em duas turmas de alunos do 3º ano do ensino médio. O Efeito Fotoelétrico e o efeito Compton foram abordados no começo do curso, dentro do tópico “natureza da luz”.

Sales et al (2008) desenvolveram e aplicaram uma atividade de modelagem exploratória, num curso de Física Quântica, oferecido para alunos de Ensino Médio com a utilização do objeto de aprendizagem (OA) denominado Pato Quântico. Neste caso, a metáfora de patos em

constante movimento no poleiro quântico representa o Efeito Fotoelétrico e permite o cálculo da constante de Planck pelos alunos. Os resultados indicam que a interação dos estudantes com o software sinalizou uma aprendizagem significativa do fenômeno, com eficiente exemplo de transposição didática dos saberes e fortalecimento de mudanças conceituais.

Neto et al (2010) apresentam a construção de uma página na Internet, como produto educacional resultante do projeto “A física Moderna no processo de formação de técnicos na área de radiologia médica”. Esta página foi utilizada durante um semestre letivo como material de apoio para a disciplina de “Proteção Radiológica”. Durante o ensino do Efeito Fotoelétrico, os autores destacaram a abordagem interdisciplinar com a física de radiodiagnóstico na utilização de telas intensificadoras (écrans).

Cavalcante e Tavolaro (2001) desenvolveram uma oficina de FMC que tinha como objetivo sua inserção no ensino médio. Nela discutem especificamente o tópico comportamento dual da luz e da matéria. A natureza ondulatória da luz é demonstrada com a realização de experiências de interferência e difração, utilizando lanternas, cílios postiços e CDs, como instrumentos para a sua decomposição. Já a natureza corpuscular da luz é evidenciada utilizando um “espectrofotômetro caseiro” construído com sensores de calculadoras solares (célula fotoelétrica), LEDs (*Light Emitting Diodo*) e um laser. As autoras também lançam mão da ajuda de simulações computacionais para explicar o Efeito Fotoelétrico e a difração dos fotoelétrons.

Cavalcante et al (2002) apresentam uma proposta para o ensino do Efeito Fotoelétrico que envolve dois recursos educacionais distintos: uma simulação computacional e um experimento prático com LED's. Por fim, os autores também indicam uma possível abordagem interdisciplinar entre professores de Física e Filosofia, apontando alternativas para uma prática docente interligada e contextualizada.

Silva et al (2012) ministraram um curso de 40 horas/aula, no qual abordaram conteúdos de FMC, de maneira conceitual, para duas turmas de 3º ano do ensino médio, uma de escola privada e outra pública. Os autores analisaram o aprendizado significativo dos conceitos pelos alunos em cada escola por meio de avaliações idênticas, aplicadas antes e depois do curso ministrado.

Os autores utilizaram além do quadro branco um experimento que evidenciava o comportamento dualístico da luz, vídeos e simulações (*software PhET Simulations*) com auxílio de notebook e Datashow. Ao final, constataram que mesmo com os alunos do ensino privado, que inicialmente sinalizaram uma base conceitual melhor do que os do ensino público, a verificação

de aprendizagem ao final do curso mostrou que as turmas tiveram desempenho satisfatório e próximo.

Em síntese, dentre os trabalhos relatados nesta categoria, os que influenciaram diretamente em nossa proposta foram: Steinberg et al (1996), De Leone e Oberem (2003), McKagan et al (2009), Cardoso e Dickman (2012), Sokolowski (2013). Primeiramente, porque todos relatam experiências de ensino do Efeito Fotoelétrico, destacando aspectos positivos e negativos, em especial, as principais dificuldades de aprendizagem dos alunos. Em segundo lugar, como a maioria (aqueles a partir do ano de 2009) faz uso de roteiro de atividades para utilização do mesmo laboratório virtual, denominado “Efeito Fotoelétrico”², os resultados destes trabalhos forneceram *feedbacks* para construção de nosso próprio roteiro.

1.1.1.5 Categoria E - Propostas ou relatos do ensino do Efeito Fotoelétrico que exploram HFC

Pinto e Zanetic (1999) prepararam um minicurso sobre a inserção da natureza quântica da luz, composto de 12 aulas, aplicado nas aulas regulares de física de duas classes do 2º ano do ensino médio. A noção de perfil epistemológico, de Gaston Bachelard, foi utilizada como referencial filosófico. As aulas abordaram diversas formas do conhecimento físico, entre elas: a descrição histórica da luz, o aspecto filosófico (Perfil Epistemológico) e atividades experimentais. Segundo os autores, a hipótese de que seja possível levar FQ para o Ensino Médio foi confirmada pelo interesse demonstrado por grande parte dos alunos.

Silva e Martins (2009) propõem e relatam uma experiência de um júri simulado no ensino de ótica, especificamente, abordando o tema “natureza da luz”, fundamentado pela HFC. Inicialmente os autores justificam o uso de HFC nas aulas de Física no ensino médio como forma de contribuir para identificação e superação de obstáculos epistemológicos à aprendizagem e possibilidade de dar um maior significado ao estudo desse conteúdo, revelando aspectos histórico-sociais importantes para o desenvolvimento dos conceitos.

Segundo Silva e Martins (2009), o papel do professor nesta estratégia é o de coordenador da atividade, porém, antes do dia do júri, este deve prover atividades que fundamentem

² Esta simulação, que é parte do *Phet Interactive Simulations Project*, na Universidade do Colorado. Disponível em: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Acessado em 10/11/2014.

conceitualmente os alunos sobre o tema. Entre as várias contribuições da estratégia, os autores destacam: favorecimento do trabalho em grupo e o diálogo entre os estudantes; socialização das concepções apresentadas pelos estudantes; incentivo à capacidade de argumentação e elaboração de hipóteses; desenvolvimento da comunicação oral e, por fim, aprendizagem dos conceitos e temas científicos.

Coelho e Borges (2010) relatam um estudo sobre o desenvolvimento do pensamento dos estudantes no campo da óptica e física moderna, especificamente sobre a natureza da luz, em um ambiente curricular no qual os conteúdos são organizados de forma recursiva e em espiral. Os autores investigaram (i) a mudança no entendimento dos estudantes sobre a natureza da luz, ao longo da terceira série do Ensino Médio e (ii) o patamar de entendimento dos estudantes sobre essa temática, ao final da terceira série.

Para avaliar o entendimento dos estudantes, os autores solicitaram que os mesmos respondessem à mesma questão dissertativa (“O que é a luz? ”) em duas ocasiões distintas em um intervalo de dez meses. Após a primeira ocasião, foi desenvolvido um sistema categórico hierarquizado constituído de cinco modelos sobre a natureza da luz e, após a segunda ocasião, observaram as possíveis mudanças de categorias dos estudantes.

Os resultados sugeriram que os estudantes possuíam um alto conhecimento prévio e as experiências que eles vivenciaram nesse período produziram efeitos significativos para o progresso nos modelos dos estudantes, mas esses efeitos não foram igualmente verificados em todas as turmas que participaram da análise. Em relação ao patamar de entendimento dos estudantes, os autores apontam que maior parte deles mobiliza os modelos eletromagnético, corpuscular (com a hipótese do quantum de energia) ou dual, mas com alguns estudantes apresentando inconsistências em suas explicações.

Sintetizando os resultados dessa categoria, consideramos que a leitura desses trabalhos nos permitiu visualizar de que maneira nossa proposta poderia contribuir para pesquisa em ensino de FMC no Brasil. Enxergamos uma inexistência de trabalhos que abordassem de modo aprofundado a história do Efeito Fotoelétrico no Brasil, tal como foi feita nos trabalhos de Kragh (1992), Klassen (2009), Niaz et al (2010) e Oon e Subramaniam (2009b).

1.1.1.6 Categoria F - Análise de livros didáticos ou manuais com respeito ao tema

Klassen et al (2011) fizeram a análise de 38 manuais de laboratório para o Efeito Fotoelétrico para estudantes de graduação em física do ponto de vista pedagógico. O foco do estudo é a forma como as bases históricas do Efeito Fotoelétrico são retratadas nestes manuais. Os critérios de avaliação dos manuais são baseados na reconstrução histórica e filosófica do Efeito Fotoelétrico, os quais foram apontados no trabalho de Klassen (2009). Como resultado, os autores apontam que nenhum dos manuais foi considerado excelente e que, em geral, ignoram o contexto histórico e dados experimentais que podem levar a interpretações alternativas do efeito. Os autores sugerem fortemente o uso de abordagem histórica para lidar com as dificuldades de compreensão conceitual do Efeito Fotoelétrico, o que não é facilitado, em investigações laboratoriais.

Alemanly et al (2013) realizaram uma investigação acerca dos aspectos de História da Ciência (HC), especificamente sobre a introdução do conceito de “quantum de luz” na comunidade científica, presentes nos livros didáticos utilizados no 2º ano do curso de Bacharel em Física, na Universidade de Alicante (Espanha). Em resumo, os autores apontam que o ensino tradicional introduz a descontinuidade da energia da radiação no momento em que são apresentadas as contradições das previsões da teoria eletromagnética com os resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico.

Os resultados dos trabalhos relatados nesta categoria não tiveram influência direta em nossa pesquisa. Porém, estes podem possibilitar, em um momento oportuno, uma análise mais qualificada acerca dos livros didática aprovados pelo Plano Nacional do Livro de Didático (2012).

A fim de demonstrar de forma mais resumida a classificação dos trabalhos analisados, construímos o gráfico 1, ilustrando o percentual de trabalhos encontrados em cada categoria.

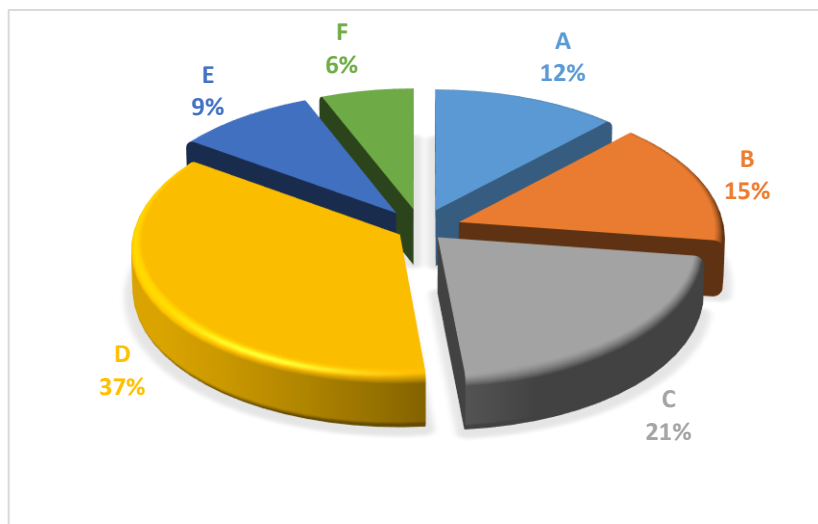


Gráfico 1 – Percentual de trabalhos encontrados por categoria.

Primeiramente, observa-se que 37% dos trabalhos encontrados propõe a abordagem do efeito fotoelétrico em sala de aula por meio da utilização de simulação computacional (categoria D). Vale destacar novamente que a maioria destes trabalhos fizeram uso de roteiro de atividades para utilização do mesmo laboratório virtual, chamado “efeito fotoelétrico”³. Em segundo lugar, podemos notar uma concentração de 21% dos trabalhos estavam relacionados aos aspectos de HFC do efeito fotoelétrico (categoria C), neste último caso, a maioria dos trabalhos são internacionais. Estas duas categorias concentram, em conjunto, 49% dos trabalhos encontrados, ou seja, praticamente a metade de todos os trabalhos identificados.

Por fim, observamos uma distribuição dos 51% restante dos trabalhos entre as categorias A, B, E e F, com um pequeno aumento na concentração de trabalhos nas categorias A e B.

1.2 O USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS NO ENSINO DE FÍSICA

Ao término de cada avaliação fica cada vez mais evidente para os professores de física as enormes dificuldades que os alunos encontram na aprendizagem desta disciplina. Em geral, a literatura tem apontado que entre as principais razões para esse problema estão os métodos inadequados e imutáveis de ensino utilizados pelos professores, o desenvolvimento cognitivo insuficiente dos alunos e a pré-existência de concepções relacionadas com o senso comum e

³ Esta simulação, que é parte do *Phet Interactive Simulations Project*, na Universidade do Colorado. Disponível em: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>. Acessado em 10/11/2014.

não com a lógica científica (FIOLHAIS e TRINDADE, 2003). Podemos ainda acrescentar outros fatores secundários, tais como a falta de afinidade e comprometimento dos alunos bem como a elevada dose de abstração exigida pela disciplina.

O cenário citado acima não é de forma alguma recente. Há cerca de 12 anos os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio - PCNEM buscam dar um novo sentido a presença do conhecimento de Física no ensino médio. Com relação aos métodos de ensino utilizados, esse documento afirma que,

[...] o ensino de Física deve deixar de se concentrar exclusivamente na simples memorização de fórmulas ou repetição automatizada de procedimentos, em situações artificiais ou extremamente abstratas, ganhando consciência de que é preciso lhe dar um significado mediante a contextualização, explicitando seu sentido já no momento do aprendizado (BRASIL, 2002, p. 60).

Em outras palavras, os PCNEM orientam para uma diversificação do processo de ensino. É com este propósito que os documentos oficiais têm sugerido aos professores a utilização de variadas estratégias e ferramentas educacionais em suas aulas, tais como: seminários, resolução de problemas, vídeos, leitura e escrita de textos, experimentos e utilização de Tecnologias da Informação e Comunicação – TICs - (sistemas automáticos de aquisição de dados, animações, simulações, hipertexto, hipermissão, entre outros).

Dentre as ferramentas citadas, o uso de TICs é talvez a mais popular para aprendizagem da Física. A introdução destas ferramentas educacionais também é bastante comentada pelos PCNEM quando indica que o ensino de Física deva

[...] acompanhar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, por exemplo, tomando contato com os avanços das novas tecnologias na medicina, através de tomografias ou diferentes formas de diagnóstico; na agricultura, através das novas formas de conservação de alimentos com o uso das radiações; ou ainda, na área de comunicações, com os microcomputadores, CDs, DVDs, telefonia celular, TV a cabo. (BRASIL, 2002, p. 68).

Nos últimos anos, a produção de objetos virtuais de aprendizagem e outras ferramentas tecnológicas para o ensino da Física, muitas das quais disponibilizadas na internet, têm aumentado abruptamente. Ao consultarmos o Banco Internacional de Objetos Educacionais, um repositório que possui objetos educacionais de acesso livre ao público, em vários formatos e para todos os níveis de ensino, identificamos especificamente para a disciplina de Física 2192 ferramentas de ensino. Dessas, 43% correspondem a animações/simulações computacionais. O restante se divide em experimentos práticos (22%), softwares educacionais e vídeos 17%, hipertextos e imagens (10%) e áudios (8%).

Considerando a ampla disponibilidade de simulações computacionais para o ensino de física, Cardoso e Dickman (2012) as definem como uma sequência de imagens de um fenômeno ou situação executadas por um *software*, contendo recursos de áudio ou não, que possibilitam ao estudante fazer alterações, selecionadas a partir de alterações nos parâmetros relevantes à situação proposta, e observar os resultados.

Rosa (1995) classifica as simulações computacionais como estática ou dinâmica. Em uma simulação computacional estática, o modelo já se encontra pronto, cabendo ao aluno apenas a manipulação de parâmetros e observação dos resultados. No caso da simulação computacional dinâmica existe a exigência de que os alunos elaborem um modelo explicativo bem como sua implementação via linguagem de programação específica. Neste trabalho, abordamos apenas o uso de simulação computacional do tipo estática, uma vez que nossos alunos não têm conhecimentos acerca de linguagem de programação.

Outro fato importante que vale a pena ressaltar é que as simulações computacionais diferem das simples animações no grau de interatividade entre a pessoa e o computador. Por exemplo, para ilustrar o “Experimento do Efeito Fotoelétrico”, uma simulação computacional deve permitir ao estudante a alteração de parâmetros relevantes, tais como intensidade e comprimento de onda da luz incidente, para os quais o programa fornecerá as respectivas animações geradas a partir de grandes bancos de dados (ROSA, 1995). Nesse sentido, devemos salientar que uma simulação computacional pressupõe necessariamente, a existência de um modelo físico que lhe dá suporte e que lhe confere significado. Logo, os resultados visualizados em uma simulação devem obedecer rigorosamente às leis físicas impostas pelos modelos.

As principais justificativas para o uso de simulações computacionais no ensino de Física, apontadas na literatura (ROSA, 1995; MEDEIROS E MEDEIROS 2002, FIOLEAIS E TRINDADE, 2003; ARAUJO e.,al. 2005), são:

- Utilidade para abordar experiências difíceis ou impossíveis de realizar na prática (por serem muito caras, muito perigosas, demasiado lentas, demasiado rápidas, muito abstratas e de difícil visualização, etc.);
- Possibilita aos alunos trabalhar sobre problemas seguindo seus próprios ritmos individuais;
- Permite aos alunos fazer várias previsões, contrastar resultados e explorar as relações entre as variáveis do fenômeno;

- Permite aos alunos contrastar e revisar suas concepções durante o uso da simulação;
- Pode-se observar construção de gráficos instantaneamente e analisar as relações entre as variáveis;
- Permite aos alunos construir modelos que serão mais ou menos aproximados do mundo real (micromundos).
- Pode ser útil como uma preparação inicial ao laboratório de Física;
- Contribui para o desenvolvimento de habilidades de resolução de problemas;
- Gera um ambiente propício para discussão sobre interpretação das soluções, no contexto de validade dos modelos físicos e nas possíveis generalizações/expansões do modelo que possam ser realizadas.

No entanto, apesar de todas as potencialidades do uso de simulações computacionais citadas anteriormente, há algumas situações que podem desfavorecer seu uso no processo de ensino-aprendizagem. Em primeiro lugar, devido ao fato de que as simulações computacionais são modelos simplificados do mundo real complexo, estas sempre contêm, necessariamente, simplificações e aproximações da realidade, muitas vezes deixando de fora aspectos de grande influência no ato da experiência real. É nesse sentido que Medeiros e Medeiros (2002) sugerem, no intuito de evitar a comunicação de concepções opostas daquelas que o professor pretende, que os alunos saibam previamente que uma boa simulação computacional é apenas uma boa aproximação virtual da realidade.

Em segundo lugar, não se pode dar às simulações computacionais o mesmo *status* epistemológico e educacional dos experimentos reais, uma vez que toda simulação está baseada numa modelagem do mundo real. Daí a necessidade de sempre evidenciar os limites de validade do modelo físico que está sendo estudado, bem como estar atento a possíveis erros conceituais. Não se pode confundir o real com o virtual e não se pode esperar que o experimento real se comporte exatamente igual ao experimento virtual. Por isso, uma simulação jamais servirá de base para testagem de uma teoria física. O experimento real será sempre o último juiz. (MEDEIROS e MEDEIROS, 2002).

Essas são as mesmas preocupações relatadas nos trabalhos de Rosa (1995) e depois em Fiolhais e Trindade (2003). Esses autores apontaram que muitos professores utilizavam simulações computacionais indiscriminadamente, sem que houvesse uma preocupação com a

confiabilidade destas e que quase sempre este uso não está fundamentado em alguma teoria de aprendizagem.

1.3 UTILIZANDO HFC NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

A História e Filosofia da Ciência - HFC constitui-se em uma área do conhecimento com fortes e profundas implicações ensino de física. Nos últimos 50 anos, a pesquisa em ensino de ciências tem evidenciado a relevância do papel desempenhado pela HFC no ensino e aprendizagem das ciências (MARTINS, 2007).

Samba e Ricardo (2014) fizeram uma análise inferencial das categorias que fundamentam e representam os argumentos de defesa da inserção da HFC no ensino de ciências no período de 1970 a 2014. Os autores apresentam dez grandes categorias temáticas:

1. **Auto aperfeiçoamento** – inclui argumentos de que a HFC é fonte de humanização e aperfeiçoamento;
2. **Elucidação** – inclui argumentos de que HFC é fonte de elucidação e “perspectiva”;
3. **Criticidade** – inclui argumentos de que a HFC é fonte de interpretação, Hermenêutica, Desmistificação, Ressignificação e “Eficiência”;
4. **Contextualização interna** – inclui argumentos vinculados à evolução do contexto interno, metodológico e cognitivo;
5. **Contextualização externa** – inclui argumentos vinculados à evolução do contexto externo histórico, das relações socioculturais, econômicas, políticas, etc;
6. **Sistematicidade** – inclui argumentos em que se expõe a HFC como fonte de relações de Inter/Multi/Transdisciplinaridade e de relações de integração sistêmica;
7. **Falibilidade epistêmica** – inclui argumentos em que se ressalta que a HFC apresenta os limites do conhecimento científico-tecnológico;
8. **Motivacional** – argumentos em que se exprime a ideia de que a HFC seria fonte de motivação e inspiração, “imaginação”;
9. **Socialização epistêmica** – inclui argumentos voltados para defesa da HFC como fonte de divulgação, literatura científica, formação do cidadão (cidadania);

10. **Ética** – inclui argumentos relacionados às propostas de pesquisa em que se tenta discutir questões filosóficas de dimensão ética relacionadas às ciências e tecnologias. A HFC seria um instrumento para alertar e conscientizar (conscientização) acerca dos problemas éticos envolvidos na produção científica e tecnológica, sobretudo aqueles relacionados a estudos de manipulação genética; eugenia, transgenia; armas biológicas, químicas e nucleares; entre outros.

Portanto, podemos reconhecer que as possíveis contribuições da HFC não somente se restringem aos aspectos diretamente ligados ao processo ensino, mas também à aprendizagem científica e tecnológica e ao desenvolvimento de mentalidade científica questionadora, crítica, criativa, inovadora e ética (SAMBA e RICARDO, 2014).

Entretanto, cabe ressaltar que apesar das inúmeras possíveis contribuições citadas na literatura, pesquisadores têm alertado para alguns obstáculos relativos à HFC em sala de aula, tais como: programa de formação de professores fundamentado na racionalidade técnica e distorções histórico-epistemológicas nos livros didáticos (narrativas linearizadas, relatos romantizados, desprezo do erro; interpretação única das evidências, etc.) (FORATO, 2009).

Segundo Klassen (2009), no caso do experimento do Efeito Fotoelétrico, estas distorções históricas ou “mitos” são:

- a) A teoria de Einstein de 1905 para Efeito Fotoelétrico foi uma extensão natural da teoria de Planck de 1900, a qual Einstein adotou e aplicou para a natureza da luz; b) o artigo de Einstein de 1905 foi primariamente uma teoria do Efeito Fotoelétrico; c) o principal aspecto da teoria de Einstein do Efeito Fotoelétrico foi dar uma explicação para os experimentos que mostravam que a energia cinética dos fotoelétrons ejetados dependia linearmente da frequência de luz incidente, mas era independente da intensidade de luz; d) os resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico são inexplicáveis sem a hipótese do fóton; e) uma vez que não havia alternativas clássicas para rivalizar, a explicação de Einstein foi imediatamente aceita e f) a verificação final da teoria de Einstein foi fornecida pela experiência de Millikan (KLASSEN, 2009, p. 720).

Em outras palavras, Klassen (2009) evidencia como evitar discussões históricas simplistas em sala de aula. Assim, com base nessas observações, buscamos na literatura trabalhos que apresentassem uma construção histórica do Efeito Fotoelétrico e que pudessem ser usados para compor nossa unidade de ensino. Encontramos nos trabalhos de Kragh (1992), Oon Subramaniam (2009a e 2009b), Klassen (2009), Niaz et al (2010) informações detalhadas do contexto histórico vivido pelos cientistas nas primeiras décadas do século XX. Todas estas informações forneceram subsídios para que o professor pudesse relatar os acontecimentos/fatos/implicações em forma de episódios, com um certo grau de suspense entre eles.

No próximo capítulo faremos um relato dos principais momentos históricos que permearam o Efeito Fotoelétrico. Este relato foi baseado nos trabalhos destes autores anteriormente citados e que serviram de norteadores para definição da sequência de apresentação do conteúdo no momento de aplicação de nossa unidade de ensino.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentaremos os fundamentos de nosso referencial teórico, que também foi usado como referencial metodológico e de análise dos dados construídos: a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (2003). Esta teoria nos orientou na elaboração de um material potencialmente significativo, na organização sequencial da apresentação das novas informações aos alunos e na verificação de indícios de aprendizagem significativa de conceitos físicos.

2.1 A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

A TAS é uma teoria construtivista e está fundamentada no princípio de que a aprendizagem é o resultado de um processo psicológico cognitivo, no qual há uma interação entre novas ideias logicamente significativas, ideias anteriores relevantes da estrutura cognitiva idiossincrática do aprendiz e um mecanismo mental do mesmo para aprender de forma significativa ou para adquirir e reter conhecimentos (AUSUBEL, 2003).

Ausubel defende que o principal processo de aprendizagem significativa é por recepção. Contrariamente ao senso comum de professores, ele argumenta que este processo está longe de ser uma atividade passiva, pois é exigido do aluno ação e reflexão sobre o que está aprendendo naquele momento.

Para entendermos a TAS, primeiramente precisamos definir dois conceitos fundamentais de sua teoria: a estrutura cognitiva e os subsunçores. Em Cardoso (2003) encontramos as seguintes definições:

A estrutura cognitiva é um conjunto de ideias, conceitos e proposições, todos com significados próprios (de cada indivíduo) dispostos como uma rede de conexões altamente organizada, entre elementos mais gerais e inclusivos e os elementos mais específicos, menos inclusivos. Tais elementos dessa estrutura são chamados de *subsunçores* ou elementos âncoras quando são utilizados de forma consciente pela memória para realizar interação de significados com novas informações ou conceitos que se quer aprender (CARDOSO, 2003, p. 23).

Por exemplo, o aluno dispõe em sua estrutura cognitiva inúmeros conhecimentos de Ciência adquiridos em ao longo de seus anos de estudo, no entanto, no intuito de aprender significativamente o conceito de fóton ou de função trabalho de um metal no estudo do experimento do Efeito Fotoelétrico, será relevante somente os significados que atribuiu aos

conceitos de estrutura atômica, força de atração eletrostática, lei de conservação da energia e quantização de energia. Em outras palavras, estes seriam os subsunçores necessários para aprendizagem significativa dos novos conceitos.

Esse processo de interação entre o novo conceito e os subsunçores existentes é o que Ausubel (2003) define como aprendizagem. Neste tipo de aprendizagem, a nova informação é incorporada à estrutura cognitiva de forma substantiva e não-arbitrária. Substantiva quer dizer não literal, não exatamente ao pé-da-letra como uma informação decorada e não arbitrária significa que a interação não é com qualquer ideia prévia, mas sim aquela que apresenta algum conhecimento especificamente relevante, já existente na estrutura cognitiva do sujeito que aprende (MOREIRA, 2006).

2.1.1 Condições necessárias para a ocorrência da aprendizagem significativa

Para Ausubel (2003), são necessários três requisitos concomitantes para que ocorra a aprendizagem significativa de um conceito: i) O aluno deve possuir específicas ideias significativas (*subsunçores*) na sua estrutura cognitiva; ii) O material a ser apresentado ao aluno deve ser *potencialmente significativo*; iii) O aluno deve ter uma pré-disposição em apreender significativamente.

Pela primeira condição, pressupõe-se que a estrutura cognitiva do aluno contenha subsunçores, com os quais, por um processo de “ancoragem”, esse conceito prévio (inter) se relacione com um novo conceito, facilitando a construção de significados e sua compreensão. A pré-existência de tal conceito prévio específico é o fator determinante no processo de aprendizagem significativa. Ausubel resumiu tal proposição da seguinte maneira, “[...] se tivesse que reduzir todo psicológico educacional a um só princípio, diria o seguinte: O fator isolado mais importante que influencia na aprendizagem é aquilo que o aluno já sabe. Averigue isso e ensine-o de acordo” (AUSUBEL et al, 1978, p. 04).

No entanto, Moreira (2006) afirma que tal tarefa não é nada simples, pois para que a estrutura cognitiva realmente facilite a aprendizagem significativa do novo conceito, as ideias que servirão de ancoradores devem ter sido aprendidas de forma significativa, isto é, de maneira não-arbitrária e não-literal. O autor destaca que nem todo conhecimento que o aluno possui é um subsunçor para a nova informação e ressalta que, “averigue isso” e “ensine-o de acordo” são tarefas ainda mais complexas, pois a maioria dos testes convencionais de investigação cognitiva estimula a memorização e não a significação.

Quanto a segunda condição necessária para ocorrência da aprendizagem significativa, no caso a necessidade de um material potencialmente significativo, Ausubel (2003) destaca a relevância do adjetivo qualificativo “potencial”, argumentando que este é mais do que mera consideração acadêmica. Segundo ele,

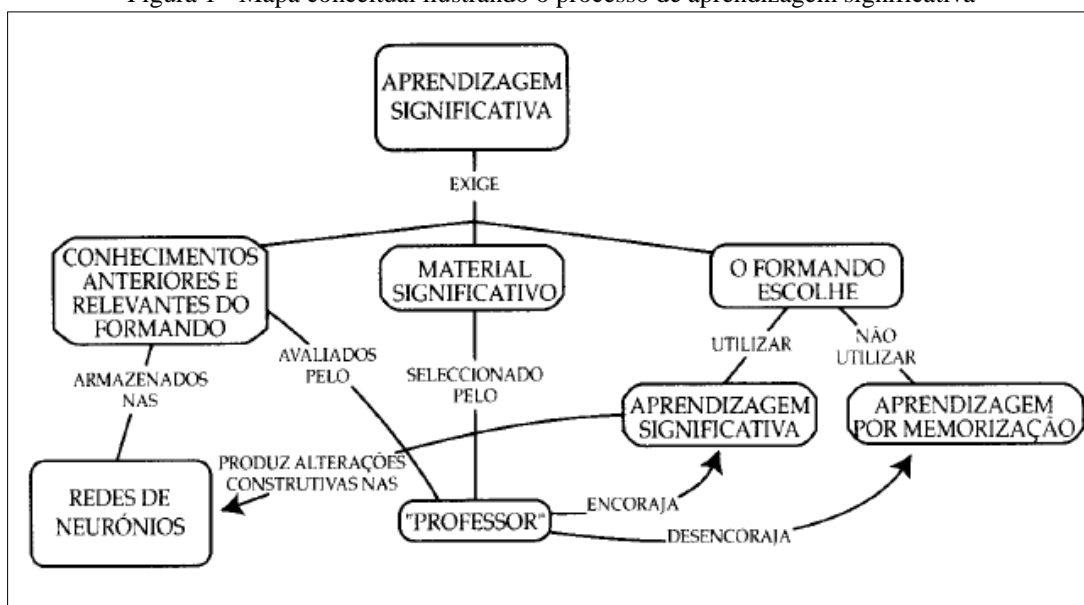
[...] caso os materiais de aprendizagem (tarefa) se considerassem simplesmente já significativos, o processo de aprendizagem seria completamente supérfluo e o objetivo da aprendizagem estaria, obviamente, já concretizado, por definição, antes de sequer se tentar qualquer aprendizagem, independentemente do tipo de mecanismo de aprendizagem empregado ou da existência de conhecimentos anteriores relevantes na estrutura cognitiva (AUSUBEL, 2003, p. 57).

Para ele o material de aprendizagem (tarefa) como potencialmente significativo:

[...] deve estar relacionado de forma *não arbitrária* (plausível, sensível e não aleatória) e *não literal* (substantiva) com qualquer estrutura cognitiva apropriada e relevante (isto é, que possua um significado ‘lógico’ para o aluno) e que as novas informações podem ser relacionadas às ideias básicas relevantes já existentes na estrutura cognitiva do aluno” (AUSUBEL, 2003, p. 06).

Por fim, na terceira condição, pontua a necessidade da pré-disposição do aluno para apreender significativamente e não mecanicamente, ou seja, ele só aprende significativamente se quiser. Portanto, independentemente da quantidade de potenciais significados que possa ser inerente a um material didático, se sua intenção for memorizá-los de forma arbitrária e literal, tanto o processo como o resultado da aprendizagem serão, necessariamente, memorizados ou sem sentido (AUSUBEL, 2003). A figura 2 ilustra um processo de aprendizagem significativa.

Figura 1 - Mapa conceitual ilustrando o processo de aprendizagem significativa



FONTE: NOVAK, 2000, p. 53

Considera que independentemente da estrutura cognitiva do aluno e sua pré-disposição, um processo de ensino pode não resultar numa aprendizagem significativa, se todas as tarefas propostas ao aluno exigirem unicamente a memorização (AUSUBEL, 2003).

Em síntese, Ausubel (2003) propõe uma teoria cognitiva de aprendizagem significativa em oposição a uma aprendizagem verbal por memorização (mecânica). Para isso, fundamenta-se no princípio de que a aquisição e a retenção de conhecimentos são produtos de um processo ativo, integrador e interativo entre o material de instrução (disciplinas) e as ideias relevantes da estrutura cognitiva do aprendiz, com as quais as novas ideias estão relacionadas de formas particulares.

2.1.2 Aprendizagem mecânica *versus* Aprendizagem significativa

Aprendizagem mecânica ocorre quando o novo conhecimento se relaciona com a estrutura cognitiva de maneira *arbitrária e literal*, não resultando na aquisição de novos significados para o aluno, nem em uma reelaboração da sua estrutura cognitiva. Para Ausubel (2003), desta forma o aluno apenas consegue interiorizar tarefas de aprendizagem relativamente simples e, estas por sua vez, tendem a ficar retidas por curtos períodos de tempo, a menos que sejam bem apreendidas.

Moreira (2006) ao discorrer sobre aprendizagem mecânica exemplifica tal situação citando a memorização de fórmulas ou definições, geralmente identificadas como processo característico de aulas de Física e empregada por alunos para a aprendizagem na véspera das avaliações, de última hora, mas que são esquecidas logo após a realização das mesmas.

Por outro lado, o processo de aprendizagem significativa se dá quando o novo conhecimento se relaciona de maneira não arbitrária e não literal com elementos específicos da estrutura cognitiva. Como consequência, a estrutura cognitiva não permanece estática, isto é, sofre reformulações à medida que acontece a interação entre os subsunçores e os novos conceitos, tornando os conceitos pré-existentes mais específicos, detalhados ou abrangentes. Assim, com a assimilação e a incorporação significativa do novo conceito à estrutura cognitiva, ela se amplia e passará a ser composta por uma nova rede estável de subsunçores (AUSUBEL, 2003).

No ensino de Física, por exemplo, se os conceitos de calor e temperatura já existem de forma significativa na estrutura cognitiva do aluno, estes servirão de subsunçores para novas

informações referentes aos processos de transferência de calor. A ancoragem de conceitos como condutibilidade térmica, condução térmica, convecção térmica e radiação térmica, resultam “[...] em crescimento e modificação, ou seja, em uma maior abrangência dos conceitos subsunçores” (MOREIRA, 2006, p. 08).

Todavia, Ausubel (2003) afirma que os dois processos de aprendizagem, a significativa e mecânica, não são necessariamente dicotômicos, eles existem num contínuo. Pode-se observar que em certas circunstâncias, como na ausência completa de elementos subsunçores, seja necessária a introdução de elementos de forma mecânica para assumirem o “papel” de subsunçores. Ou o contrário, é bem possível existir simultânea ou sucessivamente uma situação por memorização e significativa, por exemplo, no caso de um ator que apreende de forma significativa as falas antes de memorizá-las.

Após diferenciarmos os dois tipos de aprendizagem e estabelecermos as condições necessárias para ocorrência da aprendizagem significativa, a pergunta que se coloca neste momento é: Mas o que fazer se avaliações apontarem para a não-existência de subsunçores que ancoram aquilo que o professor quer ensinar?

Novak (2000) propõe a utilização de aprendizagem mecânica até que algum conhecimento relevante da área se integre de maneira significativa à estrutura cognitiva do aluno.

Ausubel (2003) propõe a utilização de certos materiais introdutórios, que seriam apresentados ao aluno antes do conteúdo novo que se quer efetivamente ensinar, denominados organizadores prévios.

2.1.3 Organizadores prévios

Um organizador prévio é um mecanismo pedagógico que ajuda a implementar os princípios da aprendizagem significativa, estabelecendo uma ligação entre aquilo que o aluno já sabe e aquilo que precisa de saber, caso necessite de apreender novos materiais de forma mais ativa e expedita. O organizador prévio resolve esta dificuldade desempenhando um papel de mediador, isto é, sendo mais relacional e relevante para o conteúdo *particular* da tarefa de aprendizagem específica, por um lado, e para com o conteúdo mais *geral* das ideias potencialmente ancoradas, por outro. Também facilita a aprendizagem através da alteração destas ideias, no sentido do conteúdo particular da matéria de aprendizagem (AUSUBEL, 2003, p. 11).

Neste sentido, uma vez que em nossa realidade escolar sempre lidamos com grupos heterogêneos de alunos, com estruturas cognitivas distintas, devem-se apresentar os

organizadores prévios a um nível mais elevado de inclusão do que os novos materiais a serem apreendidos. Assim, “[...] a principal função do organizador prévio é preencher a lacuna entre aquilo que o aluno já sabe e o que precisa conhecer para apreender significativamente a tarefa com que se defronta” (MOREIRA, 2006, p.23).

No entanto, Ausubel ainda chama atenção para o fato de que, muitas vezes os professores apresentam resumos e as visões gerais, ao mesmo nível de abstração, generalidade e inclusão do próprio material de aprendizagem. “Nestes casos, os professores apenas salientam os pontos mais evidentes do material, omitindo informações menos importantes. Assim, atingem o efeito pretendido em grande parte através da repetição e da simplificação” (AUSUBEL, 2003, p. 11).

Um organizador prévio seria então um mecanismo pedagógico como um texto, a resolução de um problema, um filme, uma animação ou simulação computacional, uma experiência, uma explanação, enfim, qualquer material que se preste a esse fim, mas que tenha alguma familiaridade com o aluno.

Ausubel (2003) propõe a utilização de dois diferentes tipos organizadores prévios: o explicativo e o comparativo. O primeiro é recomendado quando o assunto a ser aprendido é totalmente novo, assim, faz-se uma exposição geral do assunto e de suas aplicações, contextualizando para o educando. O segundo é mais útil quando o assunto for relativamente familiar, logo, por meio da diferenciação e comparação entre conceitos, poderá facilitar a aquisição de subsunçores semelhantes aos já assimilados pelo aluno.

Por fim, a natureza e as condições da aprendizagem significativa também exigem um didática em sala de aula que reconheça os princípios da diferenciação progressiva e da reconciliação integradora.

2.1.4 Os processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa

A diferenciação progressiva reconhece que a maioria da aprendizagem e toda a retenção e a organização das matérias é hierárquica por natureza, procedendo de cima para baixo em termos de abstração, generalidade e inclusão. A reconciliação integradora tem a tarefa facilitada no ensino expositivo, se o professor e/ou os materiais de instrução anteciparem e contra-atacarem, explicitamente, as semelhanças e diferenças confusas entre novas ideias e ideias relevantes existentes e já estabelecidas nas estruturas cognitivas dos alunos (AUSUBEL, 2003, p. 06).

Em outras palavras, o princípio da diferenciação progressiva é o processo de atribuição de novos significados a um dado subsunçor por meio da sucessiva utilização desse subsunçor

em diferentes situações. Assim, através de sucessivas interações, um dado subsunçor progressivamente vai adquirindo novos significados, vai ficando mais rico, mais refinado, mais diferenciado, e mais capaz de servir de ancoradouro para novas aprendizagens significativas.

Por exemplo, consideremos o conceito de “luz”. Qualquer criança já formou esse conceito antes de chegar à escola, mas com significados de luminosidade e claridade, possivelmente. No segundo ano do Ensino Médio, durante as aulas de Física, ela aprenderá os princípios básicos da ótica geométrica, bem como os principais fenômenos que podem ocorrer com a luz.

Também lhe será apresentada a definição de que a luz se propaga por meio de ondas eletromagnéticas. Para dar significado a essa definição, o aluno muito provavelmente usará o subsunçor “onda”, especialmente “onda sonora”, conceitos que provavelmente já existem em sua estrutura cognitiva, com significados associados ao cotidiano. Resultante da interação com a nova informação, o conceito de “luz” adquirirá outros significados e o subsunçor “onda” ficará mais rico, pois agora, além de som, por exemplo, significará também um fenômeno luminoso. Em outro momento, ao receber ensinamentos sobre Física Quântica, terá a oportunidade de aprender que a “luz” também pode ser interpretada de acordo com o modelo de partículas. Novamente, se a aprendizagem for significativa haverá uma interação entre o subsunçor luz e o novo conhecimento, por exemplo, “dualidade onda-partícula”. Nessa interação, “dualidade onda-partícula” adquirirá significados para o aluno e o subsunçor “luz” ficará mais diferenciado.

É importante observar que não bastaria ter apenas refinado e diferenciado progressivamente a ideia de luz, mas também seria necessário ter feito, ao mesmo tempo, muitas reconciliações entre diferenças e semelhanças entre os fenômenos óticos, sonoros e de física de partículas. Diz-se que teriam sido feitas reconciliações integradoras.

A fim de enfatizar as relações hierárquicas entre os conceitos que estão sendo progressivamente diferenciados e integralmente reconciliados, Ausubel (2003) propõe o uso de organizadores explicativos. Entre os mais utilizados atualmente, podemos citar os mapas conceituais sugeridos Novak em meados do século XX.

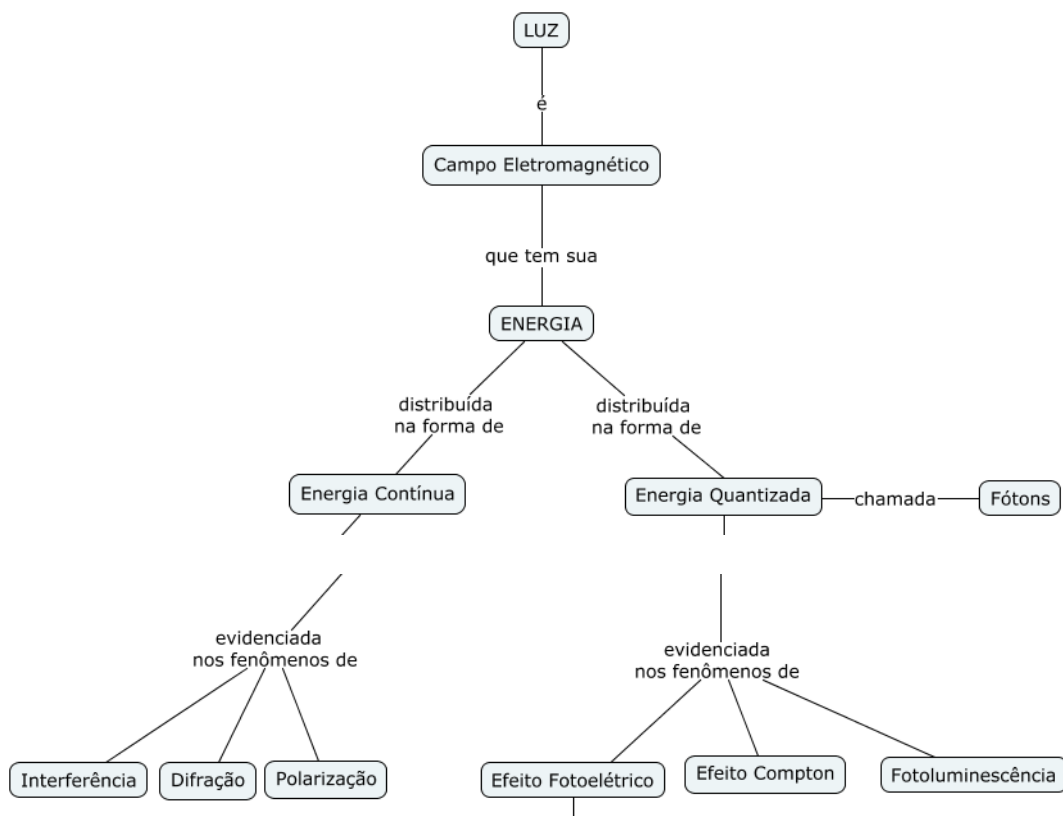
2.1.5 Organizador explicativo (mapa conceitual)

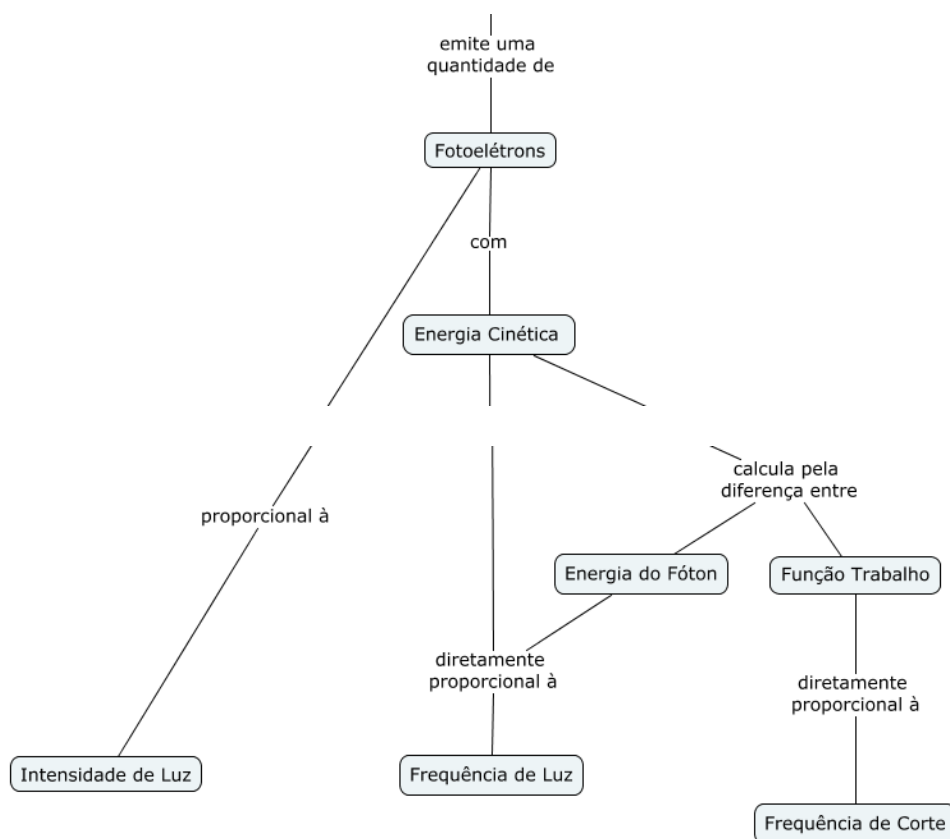
Os mapas conceituais (MCs) foram propostos por Joseph D. Novak no início de 1970 como um exercício que poderia estimular a busca por relações significativas entre conceitos. Esta ferramenta didática é uma forma esquemática de ilustrar graficamente os conceitos e suas possíveis inter-relações de um determinado campo de conhecimento.

Os MCs podem ser definidos como um conjunto hierarquizado de conceitos imersos numa rede de proposições. As proposições, que são as unidades fundamentais dos MCs, são constituídas por três elementos: conceito inicial + termo de ligação + conceito final. É exatamente a inclusão de um termo de ligação entre dois conceitos que confere aos MCs sua característica fundamental da busca por significados precisos e explícitos.

No entanto, convém salientar que erros conceituais podem ser encontrados nos MCs, uma vez que a aprendizagem significativa não implica necessariamente no estabelecimento de relações conceituais corretas. A figura 3 ilustra o mapa conceitual para luz.

Figura 2 - Mapa conceitual para natureza dual da luz





2.1.6 Identificando indícios de aprendizagem significativa

A compreensão significativa de um conceito implica em significados não duvidosos, específicos, diferenciados e transferíveis. Entretanto, se a aprendizagem significativa não for avaliada adequadamente, corre-se o risco de não se saber se ela realmente ocorreu. É possível, numa avaliação, obter do aluno apenas respostas mecanicamente memorizadas, por exemplo, quando o professor da disciplina de Física, desprezando a interpretação do problema, somente exige que o aluno apenas substitua números em uma determinada equação (MOREIRA, 2006).

Nossa experiência nos permite afirmar que muitos alunos são “treinados” mecanicamente no Ensino Médio para fazer provas. Desta forma, muitos memorizam conceitos, exemplos e algoritmos, resolvendo assim aqueles problemas-padrão que aparecem nos livros, nas aulas e nas provas.

Diante deste contexto, Ausubel (2003) enfatiza que para determinar se um conteúdo foi assimilado de maneira realmente significativa não se deve exigir uma repetição exata dos conceitos, mas deve expor o aluno a uma situação problema, diferente, nunca vivenciada, que exija uma máxima transferência e transformação do conceito adquirido.

Toma-se por exemplo, a aprendizagem de circuitos elétricos em um Curso Técnico Integrado em Edificações. Se ao invés de uma prova escrita dissertativa ou de múltipla escolha, o professor apresenta aos alunos um projeto de instalação elétrica residencial e solicita que eles o analisem e o modifiquem, de tal forma que haja uma redução no consumo de energia elétrica, tem-se assim uma situação problema na qual exige não apenas recordar conceitos ou entendê-los, mas uma transferência ou aplicação deste conhecimento para um determinado objetivo.

2.2 OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DE AUSUBEL APLICADOS NO ENSINO DO EFEITO FOTOELÉTRICO

Em nosso trabalho, a Teoria da Aprendizagem Significativa – TAS - será utilizada como referencial teórico e metodológico, ou seja, a estruturação e a abordagem em sala de aula de nossa unidade de ensino estará fundamentada nos princípios da TAS. Assim, a fim de não tornar esta contextualização repetitiva e monótona, iremos brevemente relatar o trabalho de Aragão (1976), no qual a autora propõe uma sistematização e explicitação dos aspectos teóricos fundamentais desta teoria. Ao final, ela estabeleceu 11 (onze) Princípios Fundamentais para a teoria de David Ausubel, são eles:

I. Todo ser humano possui uma estrutura cognitiva idiossincrática e dinâmica. **II.** A estrutura cognitiva é função da diferenciação progressiva de sistemas de traços de um determinado campo cognitivo. **III.** Ideias assimiladas, espontânea e progressivamente, tornam-se menos dissociáveis do sistema ideacional estabelecido até que não se encontram mais disponíveis. **IV.** Se ideias inclusivas são apresentadas, então devem ser progressivamente diferenciadas. **V.** Se relação entre ideias são estabelecidas de forma a identificar semelhanças e diferenças, então estas são incorporadas em ideias subsunçores. **VI.** Se cada novo incremento de conhecimento serve de ancoragem para aprendizagem subsequente, então a organização sequencial torna-se efetiva. **VII.** Se o novo material é introduzido sem que todas as ideias anteriores estejam consolidadas, então a aprendizagem subsequente é afetada. **VIII.** Se o material potencialmente significativo é relacionado com elementos relevantes mais inclusivos na estrutura cognitiva e se é subsumido por ela, então a aprendizagem é significativa. **IX.** A estrutura cognitiva é função da aprendizagem significativa. **X.** Se há aprendizagem significativa, então há um complexo interacional total. **XI.** Se há intencionalidade, se há disponibilidade de elementos relevantes na estrutura cognitiva e se o material é potencialmente significativo, então a aprendizagem e a retenção são facilitadas (ARAGÃO, 1976, p. 75).

Este conjunto de paráfrases busca encerrar todas as proposições gerais da teoria. No entanto, em virtude da presença de elementos comuns contidos em diferentes paráfrases, a autora buscou reduzir ainda mais a quantidade de princípios. Assim, finalmente, chegou-se a um conjunto mínimo de quatro ideias gerais (e três premissas), são elas:

I – Todo ser humano possui uma estrutura cognitiva idiossincrática e de tendência conceitualizante. **II** – Toda ideia subsumida pela estrutura cognitiva torna-se

significativa. **IIa.** Toda ideia é potencialmente subsumível pela estrutura cognitiva. **IIb.** Toda ideia da estrutura cognitiva é potencialmente subsunçora. **IIc.** Para toda ideia subsumida pela estrutura cognitiva existe uma ideia desta estrutura que é seu subsunçor. **III** – Se ideias inclusivas são apresentadas, então devem ser progressivamente diferenciadas. **IV** – Se as relações entre ideias são estabelecidas de forma a identificar semelhanças e diferenças, então estas são incorporadas em ideias subsunçores (ARAGÃO, 1976, p. 80).

Nota-se que as utilizações da diferenciação progressiva, da reconciliação integrativa, dos organizadores prévios, da organização sequencial e da consolidação, estão automaticamente contempladas pelas ideias gerais apresentadas acima.

Considerando a discussão anterior sobre a aprendizagem significativa e seus princípios fundamentais (diferenciação progressiva; reconciliação integrativa; dos organização sequencial e consolidação), retomamos brevemente a definição de cada princípio e apresentamos como os aspectos de HFC e o roteiro para utilização da simulação computacional poderão contribuir de forma decisiva para aplicação destes princípios em nossa unidade de ensino.

Primeiramente, apresentaremos as potenciais contribuições dos elementos de HFC no uso da teoria de Ausubel:

2.2.1 Possíveis contribuições dos elementos de HFC no uso da teoria de Ausubel

Diferenciação progressiva – É a atribuição de novos significados a um dado subsunçor resulta de sucessivas interações deste subsunçor para dar significado a novos conhecimentos. Assim, aos poucos, o subsunçor vai adquirindo novos significados, vai ficando mais rico, mais refinado, mais diferenciado, e mais capaz de servir de ancoradouro para novas aprendizagens significativas (MOREIRA, 2006).

Esperávamos que os aspectos de HFC fossem fundamentais para contextualização dos diversos modelos propostos para a natureza da luz e para construção da imagem do processo científico baseado na rivalidade de ideias. Além disso, em cada novo “episódio” da história, ao retratar os principais acontecimentos que permearam o estudo do Efeito Fotoelétrico, os alunos possivelmente seriam estimulados a utilizar recursivamente seus subsunçores, como por exemplo, o conceito de radiação eletromagnética. Logo, a aplicação deste conceito em uma nova situação, diferente do estudo da ondulatória, progressivamente possibilitaria um enriquecimento deste subsunçor, levando o aluno a perceber que na Física Clássica este conceito possui propriedades diferentes daquelas observadas na Física Quântica.

Reconciliação Integrativa – É um processo da dinâmica da estrutura cognitiva, que ocorre concomitantemente ao processo da diferenciação progressiva, consistindo na eliminação das diferenças aparentes, resolução de ambiguidades e inconsistências, integração de novos significados e superordenação de conceitos (MOREIRA, 2006).

Durante o processo de compreensão das ideias de Planck, Lenard, Einstein e Millikan acerca do experimento do Efeito Fotoelétrico, seria essencial uma comparação detalhada das explicações de cada um para este fenômeno. Seria neste momento de comparação entre explicações, discussão das evidências experimentais e visão de mundo de cada cientista, que os novos conhecimentos poderiam adquirir significados para os alunos.

Organização sequencial – Este princípio implica em tirar vantagem das dependências sequenciais naturais existentes no fenômeno estudado. Segundo Ausubel (2003), fica mais fácil para o aluno organizar seus subsunçores, hierarquicamente, se durante a unidade de ensino os tópicos são apresentados em termos de dependências hierárquicas naturais, ou seja, de modo que certos tópicos dependam naturalmente daqueles que os antecedem.

Abordamos o experimento do Efeito Fotoelétrico seguindo as orientações de Klassen (2009). Este autor aponta, de forma cronológica, cinco episódios cruciais da história que são necessários para uma precisa e adequada caracterização deste tema. Desta forma, a compreensão e entendimento de cada novo episódio leva em consideração os conhecimentos discutidos no episódio antecedente. Além disso, a unidade de ensino como um todo é interdependente, isto é, cada aula subsequente utiliza os conceitos abordados em aulas anteriores, favorecendo a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa.

Consolidação – Este princípio visa dar continuidade ao assunto e êxito na aprendizagem sequencialmente organizada, desde que haja domínio dos conhecimentos prévios antes da introdução de novos conhecimentos.

Assim, vale ressaltar que o estudo do Efeito Fotoelétrico nada mais é do que a porta de entrada para o estudo dos fenômenos quânticos. Portanto, a consolidação da aprendizagem significativa do conceito físico de quantização seria de suma importância para aprendizagem de outros conceitos, tais como: Modelo Atômico de Bohr, Princípio da Incerteza, Paradoxo Dualidade Onda-Partícula, Teoria Quântica de Campos, etc.

2.2.2 Possíveis contribuições da utilização da simulação computacional no uso da teoria de Ausubel

Diferenciação progressiva – Pressupõe-se que as atividades requeridas na utilização da simulação computacional ofereceriam momentos nos quais os alunos poderiam utilizar recursivamente os subsunçores discutidos em sala de aula. Estes momentos de utilização recursiva dos subsunçores seriam importantes oportunidades para o processo de construção de significados e diferenciação dos novos conceitos.

Reconciliação Integrativa - Como a simulação computacional escolhida oferece aos estudantes a oportunidade de previsão e testagem de hipóteses por meio da alteração dos valores de determinadas variáveis do fenômeno, pressupomos que isso levaria os alunos a uma tentativa de reorganização de sua estrutura cognitiva (processo assimilação de novos conceitos). Isto é, possibilitando que os novos conceitos se relacionem de maneira não-substantiva e não-arbitrária com os subsunçores presentes na estrutura cognitiva.

Organização sequencial – Buscamos satisfazer este princípio não apenas mediante a própria estruturação da unidade de ensino, mas também na elaboração do roteiro de atividades para utilização da simulação computacional. Assim, buscamos primeiramente a aplicação de uma lei geral da Física, neste caso, a Lei da Conservação da Energia, logo em seguida, em cada atividade subsequente seria testada separadamente a influência das variáveis pertinentes ao fenômeno, permitindo, ao final, que aluno possa ter uma compreensão clara do fenômeno como um todo.

Consolidação – Entendemos que outra vantagem da simulação computacional seria a possibilidade de buscar ilustrações e respostas para as dúvidas fora do ambiente formal de ensino, assim, caso o aprendiz não compreendesse completamente a primeira parte do fenômeno, sendo este pré-requisito para a subsequente, ele poderia recorrer novamente à execução desta etapa em outro momento, podendo sanar suas dúvidas e dar prosseguimento ao estudo.

Por fim, destacamos que outros recursos didáticos secundários também auxiliariam na execução dos princípios apresentados. Por exemplo, nas últimas aulas foi utilizado um mapa conceitual, elaborado com algumas proposições errôneas, que oferecia uma situação diferente na qual os alunos poderiam realizar a diferenciação progressiva, a reconciliação integrativa e consolidação dos novos conceitos.

Outro recurso extremamente importante que nos atemos foi a linguagem. A aprendizagem significativa depende da captação de significados. Esta por sua vez ocorre por meio do intercâmbio, da negociação, da troca de significados, ou seja, são situações que dependem obviamente da linguagem (MOREIRA, 2006). Assim, em nossa proposta houve inúmeros momentos de aula expositiva e dialogada, cabendo ao professor a função de estimular os alunos a externalizarem os significados captados. Ressaltamos que tínhamos consciência de que este processo poderia ser longo e só terminaria quando os alunos captassem realmente os significados que são aceitos no contexto da disciplina.

CAPÍTULO 3 - O EFEITO FOTOELÉTRICO

Optamos por fazer uma abordagem histórica no estudo inicial da Física Moderna e Contemporânea (FMC) mais aprofundada, detalhando os conflitos teóricos enfrentados pelos modelos da Física Clássica, no início do século XX e as soluções apresentadas por essa “nova Física”. Concordamos com Peduzzi e Basso (2005) que esse tipo de discussão pode possibilitar uma compreensão consideravelmente maior da revolução ocorrida, explorando sua evolução até os dias atuais com os aceleradores de partículas e dessa forma rompendo com uma utilização de História da Ciência a-histórica e a-problemática. Neste sentido, defendemos que, o estudo do Efeito Fotoelétrico, mesmo sendo complexo, tem todos os elementos necessários para apresentar esta “nova Física” aos estudantes de ensino médio.

Considerando o exposto, neste capítulo apresentamos inicialmente uma abordagem conceitual do que é o Efeito Fotoelétrico e as diferentes formas de ocorrência. Em seguida, relatamos historicamente e cronologicamente os modelos propostos para o entendimento da natureza da luz, bem como o contexto histórico da descoberta desse fenômeno, suas características, sua interpretação segundo a Teoria de Maxwell, a proposta do revolucionário modelo corpuscular para a luz de Albert Einstein em 1905, o longo período de rejeição da teoria de Einstein pela comunidade científica, a contribuição do efeito Compton para definitiva aceitação do modelo corpuscular em alguns fenômenos e, por fim, a visão contemporânea da natureza da luz.

3.1 APRESENTANDO O CONCEITO

O Efeito Fotoelétrico é um fenômeno que ocorre quando uma fotocorrente elétrica é criada em certos metais, devido à incidência de um tipo específico de radiação eletromagnética. Dentre os principais dispositivos tecnológicos baseados neste efeito podemos citar: a) sistema de iluminação pública; b) leitor de código de barras; c) sistema de segurança de fechamento de porta de elevadores; d) máquina de xerox; e) caneta tradutora e leitor óptico de CDs.

Dependendo do tipo de material em que a radiação é incidida, condutores ou semicondutores, e do resultado obtido, este pode ser classificado em três diferentes formas: fotoemissivo, fotocondutivo e fotovoltaico.

No efeito fotoemissivo, a radiação eletromagnética incidente sobre uma superfície metálica, uma placa de césio, por exemplo, transfere energia suficiente para que os fotoelétrons mais fracamente ligados ao núcleo sejam “arrancados” ou “ejetados” da superfície para o espaço. Numa célula fotoelétrica operando por este princípio, os fotoelétrons “ejetados” são direcionados para o eletrodo positivo por meio de um campo elétrico externo na região (ESPÍNDOLA et al, 1999).

No efeito fotocondutivo, que ocorre em semicondutores, a energia da radiação eletromagnética incidente é utilizada para alterar a condutividade elétrica do material. Nos semicondutores existem alguns poucos fotoelétrons que apresentam ligações relativamente fracas, necessitando de uma pequena quantidade de energia para serem arrancados. Assim, se a radiação transfere esta energia mínima, os fotoelétrons serão liberados e aumentará a condutibilidade elétrica do semicondutor (ESPÍNDOLA et al, 1999).

No efeito fotovoltaico a energia é aplicada na região de junção PN⁴ de um diodo semicondutor. A radiação eletromagnética incidente quebra as ligações dos fotoelétrons na região de junção criando cargas livres como pares fotoelétrons-lacunas. Estas cargas livres deslocam-se para os dois lados da junção, aumentando a densidade de carga do material e aumentando a voltagem da junção. A célula fotovoltaica (célula solar) é o único dispositivo que converte a luz diretamente em eletricidade, pois nenhuma corrente ou tensão externa é necessária como ocorre em relação aos outros dois efeitos (ESPÍNDOLA et al, 1999).

3.2 ASPECTOS DA HISTÓRIA DA CIÊNCIA E SEU PROCESSO EVOLUTIVO

3.2.1 Os diversos modelos propostos para a natureza da luz

Os estudos iniciais sobre a luz foram induzidos pela necessidade do homem em compreender vários fenômenos naturais e suas implicações para a vida das pessoas, tais como: relâmpago; fogo; luz solar; brilho das estrelas; fases da Lua; eclipses e todas as outras situações que produzem luz. Na antiga cultura egípcia, por exemplo, a luz, proveniente do fogo, tornou-

⁴ Denomina-se junção PN a estrutura fundamental dos componentes eletrônicos comumente denominados semicondutores, principalmente diodos e transistores. É formada pela junção metalúrgica de dois cristais, geralmente silício (Si) e (atualmente menos comum) Germânio (Ge), de natureza P e N, segundo sua composição a nível atômico. Estes dois tipos de cristais são obtidos ao se dopar cristais de metal puro intencionalmente com impurezas cujo número de fotoelétrons na camada de valência seja ligeiramente diferente do metal utilizado. Normalmente algum outro metal ou composto químico. Disponível em: <<http://www.vargasp.com/download/livros/Transistor04.pdf>>. Acessado em 21/09/2015.

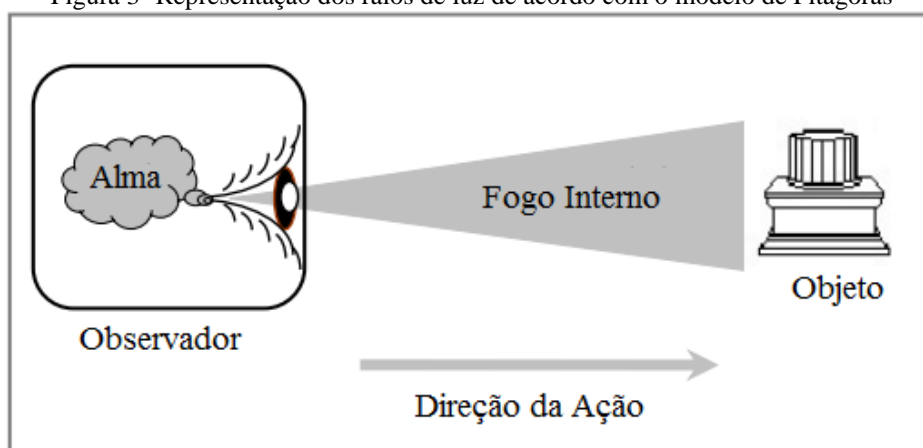
se parte essencial de rituais religiosos antigos e o Sol foi associado ao nome de diversas divindades, como por exemplo, Rá, Amon-Rá e Atum.

A cultura chinesa também reconhecia a importância mística ou espiritual da luz para vida humana,

[...] os textos de antigos médicos chineses, escritos por volta do século III a. C, conjecturavam a existência de *Ying* e *Yang*, os quais formavam a essência do universo. *Yang* representava a força da luz enquanto que *Ying* correspondia a força da escuridão. O fogo e o calor seriam manifestações de *Yang*. [...] Assim, quando uma pessoa estava doente e seu corpo frio, os antigos médicos chineses julgavam a aparência da pessoa e tomavam seu pulso para afirmar se um desequilíbrio entre *Ying* e *Yang* era a causa da doença (OON e SUBRAMANIAM, 2009a, p. 386).

Percebe-se que estas primeiras ideias estavam envolvidas por uma crença espiritual. No entanto, foi na Grécia Antiga que ocorreram as primeiras tentativas de explicar racionalmente as propriedades da luz e, principalmente, o mecanismo da visão. Por volta dos séculos V e IV a. C., os filósofos Pitágoras, Empédocles e Platão, afirmavam que os olhos emitiam “partículas de luz” que colidiam com os objetos do ambiente externo e, no retorno destas para os olhos, era completado o processo que permitia a visão (PEREIRA, 2011). Esta teoria ficou conhecida como “Teoria Tátil” ou “Teoria da Extromissão”. A figura 4 ilustra o modelo de luz imaginado por Pitágoras e seus seguidores.

Figura 3- Representação dos raios de luz de acordo com o modelo de Pitágoras

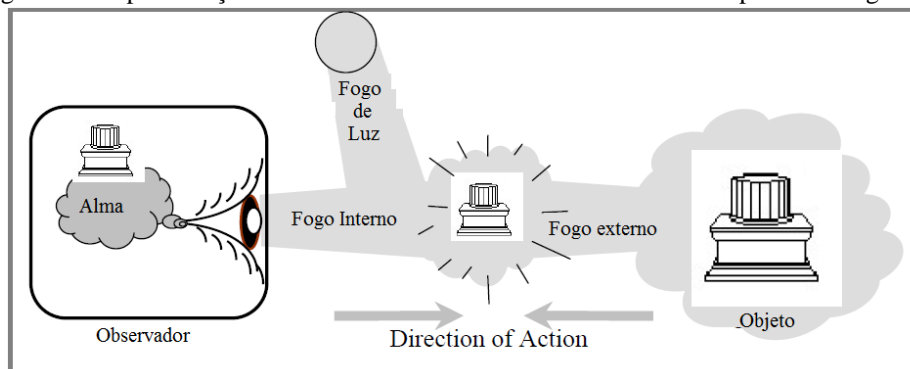


FONTE: GALILI, 2010, p. 04

Outros antigos filósofos gregos, como Aristóteles, Demócrito, Leucipo e Lucrécio, também da mesma época, defendiam um modelo diferente. Eles argumentavam que além dos olhos emitirem “partículas de luz”, os objetos também deveriam emitir “partículas” (átomos) de diversas formas e tamanhos, as quais permitiam a formação das inúmeras imagens possíveis. Assim, o processo da visão seria o resultado das várias colisões entre os “átomos” emitidos

pelos objetos e as “partículas de luz” emitidas pelo olho (PEREIRA, 2011). Esta teoria ficou conhecida como “Teoria da Emissão” ou “Teoria da Intromissão”. A figura 5 ilustra o modelo de luz imaginado por Leucipo.

Figura 4 - Representação do mecanismo da visão de acordo com Leucipo e seus seguidores



FONTE: GALILI, 2010, p. 07.

Confrontando as ideias desses antigos filósofos, percebe-se que na Teoria Tátil o processo da visão dependeria exclusivamente dos olhos, enquanto que na Teoria da Intromissão a visão dependeria tanto dos olhos como do ambiente externo.

Por volta do século III a.C., Euclides de Alexandria, promoveu um avanço significativo na compreensão do mecanismo da visão ao introduzir o princípio de que a luz emitida pelos olhos deveria propagar-se em linha reta (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Para representar o caminho percorrido pela luz, ele criou o conceito de “raios de luz” e, assim, introduziu uma abordagem geométrica rigorosa dos fenômenos luminosos.

Esta abordagem, juntamente com o desenvolvimento dos primeiros instrumentos de medida voltados para astronomia (Gnômon, Astrolábio, Sextante, entre outros), seria a fonte de inspiração para outros filósofos calcular, por exemplo, as primeiras medidas de distâncias e tamanhos dos planetas, da Lua e do Sol e da Terra.

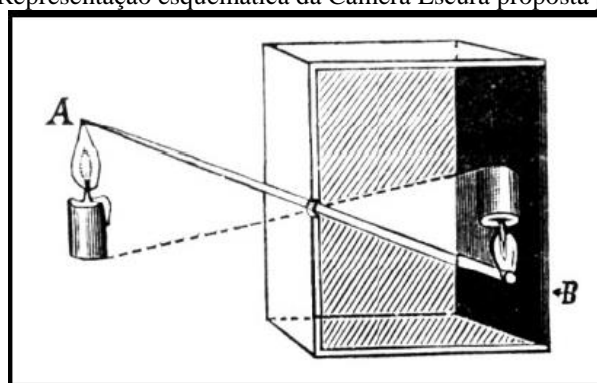
Entretanto, mesmo com a ideia de “raios de luz” de Euclides, haviam muitas perguntas sem uma resposta satisfatória: Se a luz parte de nossos olhos e vai até os objetos e, ao retornar novamente até os olhos, possibilita o processo de visão, por que não somos capazes de enxergar objetos no escuro? Por que alguns animais, como os gatos, conseguem enxergar no escuro? Como a imagem de um objeto gigante, como uma montanha, pode entrar num olho tão pequeno? Qual órgão dentro do olho produz luz? Por que não enxergamos várias imagens das mesmas coisas em nossa volta? Assim, estas questões permaneceram sem uma explicação irrefutável por mais de 1000 anos.

Influenciados pelos estudos de Euclides, o astrônomo indiano Aryabhata, em 499 d.C, no seu livro *Aryabhativa*, foi o primeiro a propor que o mecanismo da visão ocorria exclusivamente por causa da reflexão da luz nos objetos. Segundo ele, a Lua e os cinco planetas conhecidos na época (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) não emitiam luz própria, mas apenas refletiam a luz do Sol. Assim, o mecanismo da visão ocorria quando os raios de luz refletidos atingiam os olhos (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Porém, o trabalho de Aryabhata não ganhou apoio e foi rejeitado por quase todos os outros filósofos.

Ao longo dos 500 anos subsequentes a compreensão da humanidade sobre o mecanismo da visão não avançou significativamente: o sentido da visão permaneceu associados a emissão de partículas e/ou feixes de luz pelos olhos.

Foi somente na Idade Média, no início do século XI, que o matemático árabe Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham, conhecido como Alhazen, levantou sérios questionamentos sobre a existência de emissão de feixes de luz partindo dos olhos no processo de visão. Baseando-se em experimentos envolvendo uma câmera escura (também chamada câmera pinhole), por analogia, ele propôs que os raios de luz, formados por infinitas partículas, após serem refletidos pelos objetos e alcançar o olho humano, permitiam a formação da imagem destes objetos (PEREIRA, 2011). Diferentemente dos modelos gregos, a teoria da emissão de Alhazen considera a iluminação do ambiente a essência do mecanismo da visão. A figura 6 ilustra a câmera escura proposta por Alhazen.

Figura 5- Representação esquemática da Câmera Escura proposta por Alhazen



FONTE: GALILI, 2010, p. 14.

Deve-se ressaltar que atitude de Alhazen foi muito incomum para os filósofos da época, uma vez que abordagem matemática dos fenômenos, especialmente com um forte fundamento em geometria, era a mais usual. As conclusões obtidas por ele, lançando mão unicamente da experimentação como base de argumentação, deixou espaço para vários questionamentos.

Como poderia a luz ser refletida em todas as direções sem resultar num caos e confusão de imagens formadas? Quais órgãos dentro do olho recebem a luz?

Alhazen explicou que, embora haja um número infinito de raios de luz sendo refletidos em todas as direções, apenas aqueles raios que incidissem perpendicularmente à superfície do olho poderiam penetrar sem ser refratados e formar a imagem do objeto. Sobre a anatomia do olho humano, todas as religiões da época proibiam a prática de dissecação de corpos humanos como forma de buscar respostas para a ciência, assim, as ideias de Alhazen sobre a visualização de objetos ganhou muitos adeptos, como Bacon, Pechan e Vitélio (TOSSATO, 2007).

No entanto, a dissecação em animais (macacos, por exemplo) sempre fora permitida e os primeiros estudos da anatomia do olho, principalmente de Cláudio Galeno (130 d.C – 200 d.C), sugeriram que as imagens dos objetos eram formadas sobre o cristalino (lente biconvexa multifocal).

A partir do século XIII, o desejo de saber a causa da morte por razões essencialmente médico-legais ou de averiguar o que havia matado uma pessoa importante ou elucidar a natureza de uma doença ou enfermidade infecciosa, levou à liberação dos estudos da anatomia humana.

No século XVI, o famoso astrônomo matemático dinamarquês Johannes Kepler (1571-1630), descobridor das três leis dos movimentos planetários (Lei da Elipse, Lei das Áreas e Lei Harmônica), se interessou pelo estudo da óptica quando estava buscando responder porque a Lua apresenta uma diminuição aparente em seu diâmetro durante um eclipse solar (TOSSATO, 2007). Em suas investigações, ele contribuiu significativamente para o entendimento do mecanismo da visão e fez importantes correções na teoria de Alhazen e seus seguidores.

Kepler discordava da explicação de Alhazen de que somente os raios que incidissem perpendicularmente à superfície do olho poderiam formar a imagem (OON e SUBRAMANIAM, 2009a). Fundamentado nos trabalhos anatômicos de Felix Platter (1536-1614), os quais mostraram que o nervo óptico está na verdade ligado diretamente à retina, e não ao cristalino como afirmavam a tradição galênica, Kepler argumentou que o líquido orgânico (humor aquoso) refrata todos raios de luz convergindo-os sobre a retina, dando origem as imagens invertidas dos objetos dentro do olho, tal qual ocorre com uma câmera escura.

A explicação de Kepler é até hoje aceita pela comunidade científica sobre como ocorre o mecanismo da visão.

Um passo importante em direção à compreensão da natureza da luz foi dado durante a era do iluminismo europeu⁵ pelos filósofos naturais (físicos) René Descartes (1596-1650) e Isaac Newton (1642-1727), fundador da Mecânica Clássica e descobridor da Lei da Gravitação Universal.

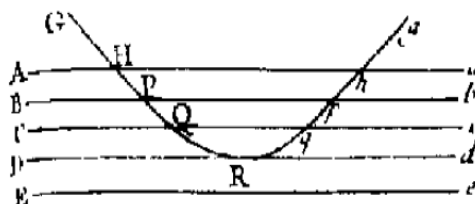
Em meados de 1644, opondo-se à ideia de vácuo (ausência de todas as substâncias), Descartes propôs que o Universo fosse totalmente preenchido por um “oceano de éter” e por causa da rotação do Sol, originavam-se ondas ou redemoinhos, os quais faziam os planetas girarem em torno dele. Para ele, o éter também deveria ser o meio material necessário para a transmissão da luz e do calor das estrelas através do espaço, análogo a necessidade de um meio material para propagação das ondas sonoras (BROCKINGTON e PIETROCOLA, 2005). Assim, a luz seria uma variação de pressão produzida pelo Sol que propagava no éter. Este é o nascimento do modelo ondulatório para a luz.

Isaac Newton concordava com a ideia de existência onipresente do éter no Universo, porém ele tinha uma visão diferente com relação à natureza da luz proposta por Descartes. Ele estava convencido de que a luz seria composta de inúmeras partículas que estavam sendo emitidas a grandes velocidades por objetos iluminados (modelo corpuscular da luz) e que interagiam com as partículas do meio. Para apoiar suas conclusões, ele realizou vários experimentos em uma sala escura sobre os fenômenos luminosos conhecidos na época, tais como: reflexão, refração, dispersão, formação de cores, entre outros.

Nos anos seguintes, Newton e outros físicos da época, como John Harris e Wilhem Jacob's Gravesande, buscaram elaborar um modelo corpuscular para explicar todos os fenômenos ópticos conhecidos baseando-se na fortemente estabelecida Mecânica Newtoniana. Por exemplo, para explicar a reflexão da luz em superfície espelhada, o modelo corpuscular afirmava que existia uma “força refratante” uniformemente distribuída na superfície do objeto. Fazendo cálculos sobre a trajetória percorrida pela luz, era demonstrado que o ângulo de incidência era igual ao ângulo de reflexão (PEREIRA, 2011). A figura 7 ilustra esta ideia.

⁵ O termo “Iluminismo” designa “o período das luzes”, ou seja aquele amplo movimento cultural, filosófico e político que se desenvolveu na Europa no decurso do século XVIII e que representou uma guinada intelectual destinada a influenciar profundamente o desenvolvimento da sociedade europeia. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=IOvB7jpmUEC&pg=PA164&dq=iluminismo+europeu&hl=ptBR&sa=X&ei=glfbVMFG4HlggS84IHACA&ved=0CCUQ6AEwAjgK#v=onepage&q=iluminismo%20europeu&f=false>. Acessado em 10/02/2015.

Figura 6 - Representação da reflexão da luz segundo o modelo de Newton

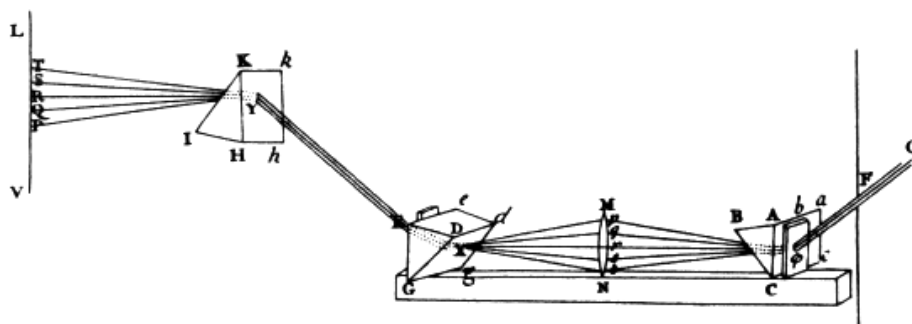


FONTE: Universidade de São Paulo⁶

Newton também conseguiu obter a mesma lei publicada por Snell-Descartes para refração ($n_i \text{sen} \theta_i = n_r \text{sen} \theta_r$). Para isso ele supôs que a “força refratante” seria normal ao vetor velocidade da partícula e que ora esta seria atrativa ora repulsiva. Desta forma, ele argumentava que as partículas de luz aumentariam de velocidade devido à força atrativa quando a luz atravessasse do ar (meio menos denso) para o vidro (meio mais denso), fazendo com que o feixe de luz se aproximasse da reta normal que divide os dois meios. Na situação inversa, as partículas a luz se afastariam da reta normal e teriam suas velocidades reduzidas por causa da força repulsiva (PEREIRA, 2011).

Newton foi o primeiro a demonstrar e explicar que a luz branca era resultado da mistura heterogênea de sete cores e que cada cor refrata de uma maneira específica, uma vez que as partículas que compõe as cores têm tamanhos diferentes - as vermelha seriam as maiores e as violetas seriam as menores. A figura 8 ilustra como Newton demonstrou a dispersão da luz branca.

Figura 7 - Decomposição, recomposição e decomposição da luz branca por Isaac Newton



FONTE: Universidade Tecnológica do Tennesse⁷

⁶ Disponível em: <<http://plato.if.usp.br/1-2003/fmt0405d/apostila/oticacorp/node6.html>>. Acessado em 27 de setembro de 2014

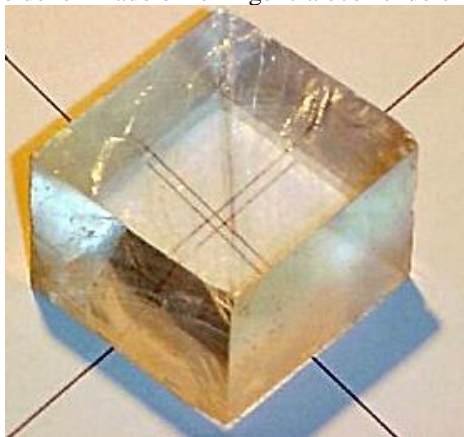
⁷ Disponível em: <http://iweb.tntech.edu/chem281-tf/newton_harre.htm> Acessado em 27 de setembro de 2014.

No prisma ABC a luz branca é decomposta nas sete cores dos arco íris. Em seguida, por meio de uma lente MN, estas cores são recombinadas opticamente formando novamente a luz branca. Por fim, esta luz branca é separada novamente pelo prisma KIH e projetada na tela LV.

No entanto, o modelo corpuscular da luz proposto por Newton e seus colaboradores apresentava sérias dificuldades. Por exemplo, este modelo não explicava satisfatoriamente como a reflexão e a refração poderia ocorrer ao mesmo tempo (algo muito comum quando a luz incide na superfície de um lago), pois a “força refratante” deveria ser atrativa e repulsiva ao mesmo tempo para ocorrer os dois fenômenos, o que tornava a explicação contraditória (PEREIRA, 2011).

A interferência de luz se mostrou extremamente difícil de ser explicada utilizando o modelo corpuscular. Imaginar e defender a ideia de que partículas que compõem duas cores distintas de luz poderiam gerar uma terceira cor, por meio de interferência, foi praticamente impossível. Além disso, em 1665, Robert Hooke (1635-1703) e Robert Boyle tinham observado e explicado que as cores que apareciam em filmes de óleo na água seriam padrões de interferência provocada por reflexão de ondas de luz na superfície superior e inferior da película fina de óleo.

Figura 8 - Fenômeno denominado birrefringência ocorrendo em um cristal de calcita



FONTE: Portal 11:11⁸

Os fenômenos de birrefringência⁹ e difração da luz também representavam obstáculos para aceitação do modelo corpuscular, uma vez que era difícil imaginar como poderiam ser

⁸ Disponível em: <http://www.portal11-11.com.br/art10.htm>. Acessado em 05/02/2015.

⁹ A birrefringência é um fenômeno, descoberto em 1669 por Erasmus Bartholinus, que consiste na propriedade que certos cristais anisotrópicos possuem de originar dois raios refratados, a partir de um único raio incidente. Estes raios serão polarizados em direções mutuamente perpendiculares e terão velocidades de propagação diferentes (TIPLER, 1995, p. 50).

formadas duas imagens diferentes de um único objeto, em um mesmo cristal, ou como partículas poderiam contornar obstáculos e gerar um padrão de interferência num anteparo. A figura 9 ilustra o fenômeno da birrefringência em um cristal de calcita.

É neste contexto de controvérsia entre modelo ondulatório e corpuscular que físicos como Christian Huygens, Willebrord Snell, Pierre de Fermat, Gustav Kirchhoff, Leonard Euler, Thomas Young, Augustin-Jean Fresnel, entre outros, buscaram fortalecer o modelo ondulatório da luz proposto inicialmente por Descartes. O físico holandês Huygens, por exemplo, em seu livro “Tratado Sobre a Luz”, publicado em 1690, assumiu que a luz era uma onda longitudinal que ficava mais lenta quando penetrava em meios de maior densidade (OON e SUBRAMANIAM, 2009a).

Huygens também propôs uma explicação para o fenômeno da difração da luz, conhecido atualmente como Princípio de Huygens. Segundo ele, as ondas têm a capacidade de contornar obstáculos se o tamanho destes for da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda. Assim, cada ponto da frente de onda luminosa possui a funcionalidade de uma nova fonte pontual, ou seja, a cada instante de tempo, a própria frente de onda gera novas ondas infinitesimais, a partir de cada um de seus pontos, dando origem a uma nova frente de onda no instante seguinte (HEWITT, 2002).

No modelo ondulatório, os fenômenos da reflexão e interferência luminosa eram facilmente explicados de forma análoga ao que ocorria com as ondas sonoras. Já a refração da luz era explicada pelo Princípio de Fermat. Este princípio afirma que a luz ao se propagar diretamente entre dois pontos, deverá fazer isto no menor tempo possível, no entanto, este poderá não ser o menor caminho. Como a luz passará por meios diferentes, esta mudará sua velocidade, assim, a luz terá sua trajetória alterada para que ela percorra um menor trecho no meio que ela será mais lenta.

Apesar do modelo ondulatório se sobressair em fenômenos em que a explicação por meio do modelo corpuscular era insatisfatória, ele também apresentava sérias dificuldades e desvantagens em outros fenômenos, como a explicação para formação das cores – era mais simples explicar utilizando o modelo corpuscular.

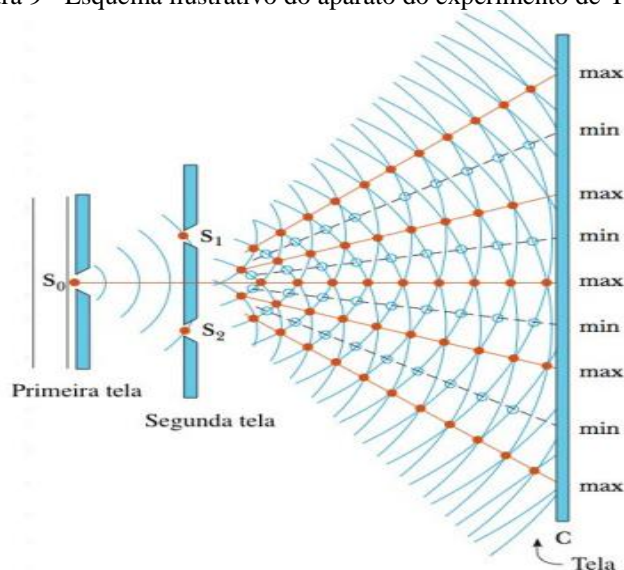
Já o fenômeno da birrefringência também não tinha explicação dentro do modelo ondulatório, pois Huygens dava um tratamento vibracional para a luz, excluindo a hipótese da mesma ser uma onda transversal. Por fim, a excelente reputação de Isaac Newton dentro da comunidade científica, devido prestígio da Mecânica Newtoniana, fez com que a maior parte

dos físicos da época apoiassem o modelo corpuscular em detrimento do modelo ondulatório (PEREIRA, 2011).

No início do século XIX os trabalhos de Thomas Young contribuíram decisivamente para que a controvérsia fosse resolvida a favor do modelo ondulatório. Primeiramente, Young buscou explicar a formação das cores utilizando o modelo ondulatório, propondo que a luz poderia apresentar diversos valores de comprimentos de onda e as cores estariam associadas aos diferentes comprimentos de onda possíveis, assim, haveria uma relação entre as cores e o movimento vibratório do éter luminífero, o que levantou a hipótese de a luz ser uma onda transversal (PEREIRA, 2011).

No final do século XVIII o modelo ondulatório da luz foi aperfeiçoado graças aos trabalhos de Thomas Young, François Jean Dominique Arago e de Augustine-Jean Fresnel. Em 1801, Young propôs o famoso “Experimento de Interferência em Fenda Dupla”, (figura 10) no qual um feixe de luz monocromática difrata e interfere consigo mesmo após atravessar duas fendas, cuja abertura é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda do feixe de luz, produzindo um padrão de interferência em um anteparo (TIPLER, 1995).

Figura 9 - Esquema ilustrativo do aparato do experimento de Young



FONTE: Universidade de São Paulo¹⁰

A formação deste padrão de interferência somente poderia ser explicada utilizando o Princípio de Huygens para a difração da luz. Os sucessivos e equidistantes pontos luminosos no anteparo demonstrariam claramente que a luz tinha sofrido interferência construtiva e destrutiva em diferentes momentos e locais. A figura 10 ilustra um esquema do experimento de

¹⁰ Disponível em http://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320293_2012/Cap3.pdf. Acessado em 05/02/2015.

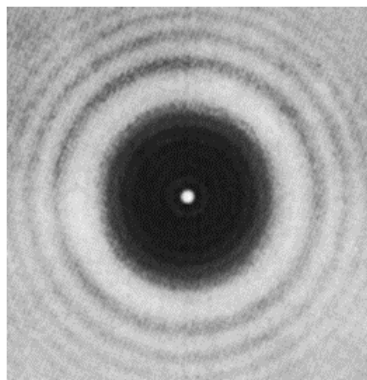
dupla fenda de Young para a luz. Nela uma fonte de luz coerente incide sobre as fendas S1 e S2 e difratam até a tela de observação, onde formam um padrão de interferência.

Em 1818, buscando resolver definitivamente a controvérsia entre modelo corpuscular e modelo ondulatório, a Academia de Ciência Francesa, por intermédio dos físicos Pierre Simon de Laplace, Jean-Baptiste Biot e Siméon Denis Poisson, defensores do modelo corpuscular para a luz, ofereceram um prêmio para quem colocasse um ponto final a disputa. Contrariamente as esperanças destes físicos, a teoria ondulatória da luz de Young para o padrão de interferência recebeu um considerável apoio do físico francês Fresnel.

Barthem (2005) relata este episódio histórico da seguinte forma:

Um dos juízes era o matemático Siméon Denis Poisson (1781 - 1840). Poisson, querendo mostrar que a teoria de Fresnel estava incorreta, apresentou um argumento através da prova pelo absurdo. Tomando o inverso de um orifício, ele mostrou que, pela teoria de Fresnel, deveria aparecer um ponto brilhante no centro da sombra de um objeto circular o que, logicamente, seria impossível. Arago, com quem Fresnel manteve uma colaboração durante algum tempo, era o juiz e decidiu montar imediatamente a experiência. O ponto luminoso foi observado e passou a ser conhecido como a “Mancha de Poisson” (BARTHEM, 2005, p. 65).

Figura 11 - Mancha de Poisson



FONTE: Universidade de Harvard¹¹

Além do episódio descrito acima, pode-se afirmar que Fresnel deu três grandes contribuições ao trabalho de Young, a saber: i) O tratamento matemático utilizado no estudo da difração e polarização de uma luz monocromática foi extremamente rigoroso; ii) As observações experimentais de difração e polarização da luz eram de melhor qualidade, isto é, foi possível destacar detalhes que passaram despercebidos por Young; iii) Propôs que o fenômeno da polarização poderia ser melhor explicado assumindo que a luz fosse uma vibração

¹¹ Disponível em: <http://isites.harvard.edu/fs/docs/icb.topic186206.files/images/PoissonsSpot13-1024.jpg>. Acessado em 27 de setembro de 2014.

transversal no éter, e não longitudinal como Young imaginava (OON e SUBRAMANIAM, 2009a).

O último grande passo dado a favor do modelo ondulatório da luz foi proporcionado pelos trabalhos de James Clerck Maxwell em 1874. Como um dos resultados derivados das famosas “Quatro Equações de Maxwell”, foi previsto que a velocidade das ondas eletromagnéticas, produzidas por um circuito de corrente alternada, coincidia com o valor da

velocidade da luz e seria dada por $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$, onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do meio e

μ_0 é a permeabilidade magnética do meio. Assim, Maxwell concluiu que a luz também deveria ser formada por oscilações do campo eletromagnético propagando-se através do “oceano de éter” contido espaço.

Em 1888, Heinrich Rudolf Hertz, demonstrou experimentalmente a existência das ondas eletromagnéticas tal como previsto teoricamente por Maxwell, bem como formas de controlar a frequência destas ondas produzidas.

O fenômeno da birrefringência, o qual representa um grande obstáculo tanto para o modelo corpuscular quanto para o ondulatório, somente foi explicado levando-se em consideração que a luz seria onda eletromagnética transversal e a existência de materiais com anisotropia óptica. Desta forma, a luz ao penetrar no cristal anisotrópico poderia ser dividida em dois feixes polarizados e perpendiculares que se propagariam com velocidades diferentes, formando duas imagens em locais diferentes (PEREIRA, 2011).

Esse breve relato histórico buscou mostrar como foi construída a visão de mundo dos físicos sobre a natureza da luz na virada do século XX. Ao final, procuramos evidenciar que qualquer nova questão relacionada à natureza da luz seria prontamente investigada por quase todos os cientistas utilizando o modelo eletromagnético para a luz, pois este tinha vencido, pelo menos até aquele momento, vencido a batalha científica contra o modelo corpuscular.

3.2.2 O contexto histórico da descoberta do Efeito Fotoelétrico por hertz

No final do século XIX haviam alguns problemas centrais que direcionavam o desenvolvimento da Física, muitos dos quais estavam diretamente ligados às novas formas de comunicação, especialmente no desenvolvimento da comunicação sem fio, isto é, a busca por mecanismos capazes de transmitir eletricidade em ambientes de baixa pressão (gases

rarefeitos). É neste contexto que as ondas eletromagnéticas, previstas teoricamente pelas equações de Maxwell, se apresentavam como uma área de pesquisa muito promissora.

Assim, a comunidade científica tinha alguns objetivos imediatos com relação às ondas eletromagnéticas, tais como: i) demonstrar sua existência experimentalmente; ii) descrever sua natureza; iii) compreender a sua interação com o meio de propagação e iv) compará-las com a luz (MANGILI, 2012).

Com relação à visão de mundo da comunidade científica europeia por volta do ano de 1890, podemos citar a consequente “explosão” de trabalhos científicos após a descoberta dos raios catódicos e dos raios X em meados da década de 1800, por Julius Plücker. Estes trabalhos levaram à descoberta das primeiras partículas subatômicas e a proposta do modelo atômico conhecido como “Pudim de Passas” por Sir John Joseph Thomson em 1889.

Estes eram os principais campos de pesquisa para futuros físicos como Heinrich Rudolf Hertz. Ele teve a oportunidade de trabalhar com um dos maiores nomes do campo da Física alemã, o físico Herman Von Helmholtz (1821 – 1894). “Em 1878, Helmholtz tinha como tema de pesquisa os efeitos elétricos em diversos meios, assunto que viria a interessar a Hertz futuramente” (MANGILI, 2012, p. 06). Após resolver rapidamente outros trabalhos oferecidos anteriormente por Helmholtz, Hertz resolveu dedicar-se definitivamente a um desafio da Academia de Ciências de Berlim, que

[...] ofereceu um prêmio para a verificação experimental da teoria de James Clerk Maxwell (1831-1879). [...] O trabalho para a resolução desse problema veio a ser o cerne de seus estudos sobre propagações elétricas em meios físicos e, provavelmente, teve influências importantes naquilo que conhecemos hoje por Efeito Fotoelétrico (MANGILI, 2012, p. 07).

Nos cinco anos seguintes, já em 1883, Hertz estudava os fenômenos luminosos em gases rarefeitos, pois estes ainda eram considerados “obscuros” e “inexplorados” pela comunidade científica. No entanto, alguns aspectos relacionados a este estudo o levou inevitavelmente ao problema da propagação da eletricidade através dos meios materiais, pois Hertz já desconfiava que as descargas elétricas (denominadas de *sparks*) geradas nos experimentos poderiam ser comparadas à luz. Segundo Mangili (2012, p. 08), Hertz afirmou: “A conclusão é clara: raios catódicos têm tanto a ver com eletricidade, como a luz de uma lâmpada de bulbo incandescente”.

Em 1886, quando Hertz já era professor na Universidade de Karlsruhe, ele decidiu dedicar-se inteiramente ao antigo e ainda não solucionado desafio oferecido pela Academia de

Ciências de Berlin em 1879. Em seu laboratório, ele tinha elaborado e construído aparatos experimentais em que era possível controlar habilmente as *sparks* e, assim, verificar se existia alguma relação entre o comportamento delas com o esperado pelas ondas eletromagnéticas previstas pela Teoria de Maxwell, em diversos meios.

Em 1888 Hertz publicou os resultados de suas pesquisas em um artigo intitulado “A Força das Oscilações Elétricas Tratadas de acordo com a Teoria de Maxwell¹²”. Entretanto, um fenômeno estranho chamou a atenção de Hertz durante as investigações, um efeito notório que, segundo ele, não poderia ser negligenciado,

[...] uma série de experimentos sobre os efeitos de ressonância entre oscilações elétricas muito rápidas que eu conduzi e, recentemente, publiquei, duas *sparks* elétricas eram produzidas pela mesma descarga de uma bobina de indução, e consequentemente simultâneas. Uma delas, a *spark* A, era a *spark* da descarga da bobina de indução e servia para criar a primeira oscilação. A segunda, a *spark* B, pertencia ao circuito induzido ou secundária oscilação. A última não era muito luminosa; nos experimentos, seu máximo comprimento tinha que ser habilmente medido. Eu ocasionalmente encapsulava a *spark* B numa caixa escura, sendo assim mais fácil para fazer a observação; e fazendo isso eu percebi que o máximo comprimento ficava decididamente menor dentro da caixa do que fora. Removendo em sucessão várias partes da caixa, era visto que a única porção que exercia esse efeito prejudicial era a que escondia a *spark* B da *spark* A. [...] Eu não tive a intenção de permitir que esse fenômeno distraísse minha atenção do objetivo principal que eu tinha em mente; mas isso ocorreu de um modo tão definido e perplexo que eu não poderia completamente negligenciá-lo (HERTZ, 1888 apud MANGILI, 2012, p. 14).

É neste momento que Hertz se refere a descoberta de um novo efeito, o “Efeito Hertz”, denominado posteriormente de “Efeito Fotoelétrico”. No entanto, assim que ele soube que estava lidando com efeitos da luz ultravioleta sobre as *sparks*, ele decidiu fazer três coisas: 1) Publicar um artigo sobre o tema intitulado “Sobre o Efeito da Luz Ultravioleta Sobre Descargas Elétricas¹³” (tradução Mangili (2012)); 2) Voltar sua atenção ao problema da criação e propagação das *sparks* e 3) Oferecer o desafio de explicar este novo fenômeno a alguns de seus assistentes de laboratório, como Wilhelm Hallwachs e Philip von Lenard.

Infelizmente Hertz não viveu o suficiente para ver o desfecho desta história. O físico alemão faleceu em 1894, seis anos após a comprovação experimental das ondas eletromagnéticas, aos 37 anos, devido a uma infecção bacteriana na orelha.

¹² Tradução: “Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie”

¹³ Tradução: “Über einen Einfluß des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung”

3.2.3 A explicação de Philip Von Lenard para o Efeito Fotoelétrico

Os assistentes de laboratório de Hertz decidiram buscar uma explicação teórica para o “Efeito Hertz” somente após a realização de um exaustivo trabalho experimental, no qual pretendiam identificar as principais características do fenômeno. Wilhelm Hallwachs, em 1890, utilizando dois eletroscópios de placas de zinco carregados, um negativamente e outro positivamente, concluiu que a luz ultravioleta emitida pelas *sparks* descarregava imediatamente o eletroscópio de carga negativa, mas não influenciava o eletroscópio de carga positiva (KLASSEN, 2009).

Outros cientistas também se interessaram pela descoberta do novo efeito. Em 1890, Sir J. J. Thomson, na Inglaterra, provou que a “eletricidade negativa” emitida pelas placas de zinco sob incidência de luz ultravioleta era da mesma natureza dos raios catódicos. Sua conclusão foi de que a placa de zinco estava emitindo “partículas negativas”, conhecidas como fotoelétrons (KLASSEN, 2009).

Em 1902, Philip von Lenard, ex-assistente de Hertz e que tinha um conhecimento aprofundado em raios catódicos, realizou importantes experimentos nos quais era possível afirmar qualitativamente a influência de algumas variáveis do fenômeno, tais como: frequência e intensidades da radiação, potencial de corte dos raios produzidos e o tipo placa metálica.

A pesquisa de Lenard sobre o Efeito Fotoelétrico produziu evidências surpreendentes, pelo menos inicialmente, para os físicos da época. Segundo Tipler (1995),

1. Abaixo de certa frequência mínima de luz, o Efeito Fotoelétrico simplesmente não ocorre, mesmo utilizando luz com alta intensidade;
2. Acima da frequência mínima o efeito ocorre imediatamente e a intensidade de luz não influencia nas energias cinéticas dos fotoelétrons emitidos, mas sim na quantidade de fotoelétrons;
3. A energia cinética máxima dos fotoelétrons é maior para as frequências mais altas de luz (TIPLER, 1995, p. 181).

As conclusões de Lenard foram inicialmente surpreendentes porque refutavam as previsões da Teoria de Maxwell para o Efeito Fotoelétrico. Considerando o modelo ondulatório para a luz e acreditando que na incidência da radiação sobre a placa há um processo de transferência de energia, a teoria eletromagnética previa:

1. O efeito deverá demorar a ocorrer após a incidência da radiação eletromagnética;
2. O efeito deverá ocorrer para todas as frequências de radiação incidente;
3. Um número grande de fotoelétrons deverá ser emitido, pois a radiação eletromagnética se espalhará pela superfície;
4. A energia cinética dos fotoelétrons emitidos dependerá unicamente da intensidade de luz

incidente, pois a energia de toda onda eletromagnética é função da intensidade da onda (amplitude) e não da frequência (TIPLER, 1995, p. 183).

As contradições entre as previsões da Teoria de Maxwell e os resultados experimentais, convenceram Lenard e muitos outros físicos de que na incidência da radiação eletromagnética sobre a placa metálica não haveria transferência de energia. Lenard elaborou uma explicação para o Efeito Fotoelétrico, denominada “Hipótese de Disparo”. Segundo ele, uma vez que os fotoelétrons eram “ejetados” imediatamente quando a luz incidia na placa e eles tinham energia cinética que não dependia da intensidade de luz, esta energia cinética seria decorrente do átomo. A luz apenas estava “disparando” os fotoelétrons (NIAZ, et al 2009). Como a estrutura interna do átomo ainda era um problema em aberto, a solução de Lenard pareceu razoável para quase todos os físicos da época, pois não representava uma dificuldade para teoria de Maxwell (KLASSEN, 2009).

Entretanto, a “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902) não estava imune a críticas pontuais. Imaginando-se que os fotoelétrons já possuíssem tal energia cinética dentro do átomo antes de serem “ejetados”, esperava-se que o simples aquecimento da placa metálica de zinco por uma fonte térmica fosse suficiente para aumentar a velocidade dos fotoelétrons e “ejetá-los”, analogamente como ocorria com a luz ultravioleta. No entanto, não foi encontrada nenhuma evidência experimental de que temperatura influenciava no fenômeno (NIAZ et al, 2009).

Devido às limitações dos experimentos, os resultados da Lenard eram em sua maioria qualitativa e ele não foi capaz de obter relações quantitativas específicas das variáveis do fenômeno. No entanto, ele teve muitas honras por seu trabalho. Em 1905, Lenard foi agraciado com o Prêmio Nobel em Física por seu trabalho sobre os raios catódicos.

3.2.4 O modelo corpuscular de Albert Einstein *versus* o modelo eletromagnético clássico

Em 1905, aos 26 anos de idade, o físico teórico alemão Albert Einstein refletia sobre as profundas diferenças existentes entre os conceitos teóricos (surgidos a partir dos estudos dos gases e corpos aquecidos) e a Teoria de Maxwell para propagação de ondas eletromagnéticas no espaço vazio. Suas reflexões sobre a interação de uma onda eletromagnética com um átomo

resultaram em seu famoso artigo intitulado “Sobre um Ponto de Vista Heurístico Referente à Produção e Transformação da Luz¹⁴”.

Na introdução deste artigo, Einstein de imediato apresenta sua ideia revolucionária de “quanta de energia da luz”, conhecida atualmente como fóton.

[...] Parece-me que as observações da “radiação de corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta e outros fenômenos relacionados com a emissão ou transformação de luz são facilmente e melhor compreendidas assumindo que a energia luminosa está descontinuamente distribuída no espaço. De acordo com essa afirmação aqui considerada, na propagação de um raio de luz emitido de uma fonte pontual, a energia não está distribuída continuamente ao longo do volume crescente do espaço, mas consiste de um número finito de energia quanta localizada em pontos do espaço que se move sem se dividir e podendo ser absorvida ou gerada apenas em unidades completas (EINSTEIN, 1905, p. 02).

Segundo Einstein, cada “quantum de luz” transportava uma quantidade de energia bem definida que era diretamente proporcional à frequência da radiação eletromagnética. A constante de proporção teria o mesmo valor da constante de Planck (h), que tinha sido recentemente proposta por Max Planck no estudo da radiação do corpo negro.

No entanto, as interpretações para a quantização da energia dada pelos dois cientistas foram completamente diferentes. Planck acreditava que os osciladores das paredes do corpo negro (átomos, na visão moderna) deveriam vibrar com, e somente com algumas quantidades de energia e que a luz estava totalmente explicada pela Teoria de Maxwell. Já Einstein propôs que, em certos fenômenos luminosos, a luz deveria ser interpretada como “pacotes de energia” ou “partículas de luz” e não como uma onda eletromagnética.

Ao longo de seu artigo, Einstein listou alguns fenômenos que poderiam ser compreendidos e utilizados para testar seu modelo corpuscular para a luz, um deles era a geração de raios catódicos por luz ultravioleta em metais, ou seja, o Efeito Fotoelétrico. Ao contrário de Philip von Lenard, Einstein tinha convicção que a energia cinética dos fotoelétrons emitidos era proveniente da radiação eletromagnética incidente, assim, ele utilizou a Lei de Conservação da Energia para explicar este fenômeno.

Nas palavras de Einstein este fenômeno poderia ser compreendido da seguinte forma:

[...] A energia “quanta” ($E=h.f$) penetra na camada de superfície do corpo e é transferida, pelo menos em parte, para energia cinética dos fotoelétrons. A concepção mais simples é que um quantum de luz transfere toda a sua energia a um único elétron; assumiremos que isso acontece. [...] Um elétron com energia cinética no interior do corpo perderá parte de sua energia cinética até

¹⁴ Tradução: “Über einen die Erzeugung und Versandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”

que atinja a superfície. Além disso, assumiremos que cada elétron, para deixar o corpo, tem de realizar uma quantidade de trabalho W (característica de cada corpo). Os fotoelétrons emitidos com maiores velocidades [$E_c(\text{máx})$] serão aqueles localizados próximos a superfície e ejetados perpendicularmente a ela (EINSTEIN, 1905, p. 18).

Matematicamente, o fenômeno pode ser descrito da seguinte forma: $E_c(\text{máx}) = h.f - W$

Se os fotoelétrons, cuja carga elétrica é “ e ”, são freados pela aplicação de uma diferença de potencial negativa (potencial de corte) de valor V , então a relação acima torna-se: $e.V = h.f - W$. Sobre as evidências experimentais encontradas por Lenard em 1902, Einstein ainda afirmou:

Além do mais eu posso afirmar que esta descrição do Efeito Fotoelétrico não contradiz as propriedades encontradas por Mr. Lenard. Se a energia de cada “quantum de luz” é transferida para energia cinética de um elétron, independentemente dos outros, então a distribuição de velocidade dos fotoelétrons, isto é, a natureza dos raios catódicos produzidos, será independente da intensidade de luz incidente, por outro lado, sob circunstância idênticas, o número de fotoelétrons que deixa o objeto será proporcional a intensidade de luz incidente (EINSTEIN, 1905, p. 19).

Além disso, Einstein colocou a sua ideia a prova na seguinte afirmação, “[...] se a minha fórmula derivada estiver correta, então o potencial de corte, quando plotado em coordenadas cartesianas como função da frequência da luz incidente, deverá ser uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza das substâncias em estudo” (EINSTEIN, 1905, p. 19). Embora Lenard (1902) tivesse apontado que havia uma dependência entre a energia cinética do elétron emitido, com a frequência de luz incidente (medida através do potencial de corte), não havia ainda nenhuma teoria física que afirmasse qual era o tipo de relação matemática entre estas duas grandezas. Einstein foi o primeiro a propor que elas eram linearmente dependentes. Esta previsão de Einstein se tornaria o principal tema de pesquisa do programa de Robert Millikan pelos próximos dez anos.

3.2.5 A rejeição da comunidade científica à proposta de Einstein e o experimento de Robert Millikan

Como a hipótese de Einstein abria mão da bem-sucedida teoria de Maxwell para os fenômenos que envolviam a interação da radiação eletromagnética com o átomo e representava

um retorno ao derrotado modelo de partículas newtoniano, ela foi amplamente rejeitada pela comunidade científica por cerca de 15 anos.

Em 1913, oito anos após a publicação de seu artigo revolucionário, Einstein foi indicado para Academia Prussiana de Ciência, em Berlim. Nesta época, segundo Wheaton (1983), Max Planck escreveu várias cartas a outros físicos defendendo a indicação do jovem cientista alemão, porém com algumas ressalvas:

Eu penso que ele [Einstein] pudesse ter ocasionalmente se perdido em suas especulações, como por exemplo com sua hipótese de “quanta de luz”, penso que não seja seguro nos opormos demasiadamente a ele, pois é impossível introduzir novas ideias, mesmo em ciências exatas, sem correr riscos (WHEATON, 1983, p. 194).

Niels Bohr, que tinha sido o primeiro a formular a teoria quântica do átomo, em seu discurso de recebimento do Prêmio Nobel, também expressou sua divergência em relação ao conceito de “quanta de luz” dizendo: “A despeito de seu valor heurístico, a hipótese dos quanta de luz, o que é bastante incompatível com os chamados fenômenos de interferência, não é capaz de lançar luz sobre a natureza da radiação. ” (BOHR, 1922, p. 14).

Já para o físico norte-americano Robert Millikan, o Efeito Fotoelétrico era mais fácil de ser explicado por um raciocínio bem próximo à “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902). Segundo ele, um metal fotossensível contém osciladores de todas as frequências e estão, a todo o momento, oscilando com valores de energia ($E = h.f$). Alguns poucos destes osciladores estão em ressonância com a frequência da radiação incidente (f_0) e, assim, absorvem energia luminosa até alcançar um valor crítico de energia até ocorrer a emissão do elétron do átomo (KLASSEN, 2009).

No intuito de refutar o modelo corpuscular de Einstein (1905) para a luz, Millikan dedicou-se arduamente em construir um aparato experimental que pudesse testar a equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico. Após dez anos de pesquisas, em 1915, Millikan tinha verificado experimentalmente que a equação de Einstein estava correta. Além disso, ele também encontrou um valor experimental muito próximo ao valor teórico para a constante de Planck (erro de 0,5%) (KLASSEN, 2009).

No entanto, Millikan rejeitou enfaticamente o conceito de “quanta de luz”. Na publicação de seus resultados em 1916, Millikan afirmou: “[...] atrevida, para não dizer imprudente, a hipótese de que luz eletromagnética tem uma partícula de energia. Isso vai contra todas as evidências completamente estabelecidas de interferência da luz” (WHEATON, 1983, p. 241).

Millikan recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1924 por seus trabalhos sobre o Efeito Fotoelétrico e pela determinação do valor experimental da carga elétrica fundamental.

3.2.6 A explicação do efeito Compton como fator definitivo para aceitação do modelo corpuscular de Albert Einstein pela comunidade científica

O físico norte-americano Arthur Holly Compton tinha como tema de pesquisa a o espalhamento dos raios X em alvos de alumínio em meados da década de 1910. Diversos trabalhos anteriores sobre este tema tinham relatado a diferença entre os comprimentos de onda dos feixes incidentes e espalhados. Após trabalhar por muitos anos sobre algumas explicações especulativas, como por exemplo o modelo do grande elétron, Compton percebeu que o aumento do comprimento de onda (diminuição da energia) do feixe dos raios X, após deixar o alvo de alumínio, era influenciado pelo ângulo de espalhamento.

Então, Compton resolveu utilizar uma abordagem quântica para o fenômeno. Ele imaginou o espalhamento dos raios X com o alvo de alumínio como uma colisão entre bolas de bilhar, ou seja, uma colisão entre um “quantum de luz” e um elétron livre. Nesta situação, o momento linear e a energia total do sistema deveriam ser absolutamente conservados. No entanto, esta descrição tornou-se razoavelmente complicada, por que o elétron adquiria uma velocidade altíssima após a colisão, o que fez Compton levar em consideração expressões relativísticas para o momento linear do elétron (KLASSEN, 2009). Porém, ele conseguiu ao final obter uma expressão simples para o efeito,

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos\theta)$$

onde λ' é o comprimento de onda do feixe espalhado em um ângulo θ , λ_0 é o comprimento de onda do feixe incidente, m_e é a massa do elétron, h é a constante de Planck e c é a velocidade da luz.

Em seu discurso ao receber o Prêmio Nobel em maio de 1924, Millikan já previa que a solução para o dilema do “quantum de luz” estava bem próxima: “[...] Possivelmente os recentes avanços tidos por Duane, Compton, Epstein e Ehrenfest, podem vir a dar frutos trazendo até mesmo a interferência sob o controle de “quanta de luz” localizado. Mas este ainda é um caminho obscuro” (MILLIKAN, 1966, p. 65).

A explicação de Compton também não foi bem aceita pela comunidade científica. O físico Niels Bohr, que refutava veementemente a hipótese de “quanta de luz”, foi um dos principais cientistas que se dedicaram a refutar esta explicação. Entretanto, em 1925, após várias comprovações experimentais de que tanto a energia como o momento linear do “quantum de luz” e do elétron estavam sendo conservados, Bohr teria afirmado: “Parece-me que não há mais nada a fazer do que dar aos nossos esforços um possível e honrável funeral” (KLASSEN, 2009, p. 729).

Em 1926, o químico Gilbert Lewis inventou a palavra fóton para designar o conceito de “quanta de luz” e desde então a comunidade científica não teve outra alternativa a não ser reconhecer que, para determinados fenômenos, a interpretação mais adequada para luz é tratá-la como sendo composta de “pacotes de energia”.

3.2.7 O conceito de dualidade onda-partícula

A nova interpretação para da natureza da luz desafiou a compreensão e a visão determinista do mundo. No entanto, a proposta revolucionária de Einstein de 1905 de “quanta de luz” exigia uma visão dual da natureza luz. Na introdução de seu artigo, Einstein afirma:

A teoria ondulatória da luz, que opera com funções espaciais contínuas, provou-se exacerbadamente na descrição de fenômenos puramente ópticos e provavelmente nunca será trocada por outra teoria. Deve-se ter em mente, entretanto, que observações ópticas referentes à média de tempo em vez de valores instantâneos, [...] levam a contradições quando aplicada aos fenômenos de emissão e transformação de luz (EINSTEIN, 1905, p. 02).

Pela citação acima fica evidente a tentativa de Einstein negar, de certa forma, a aplicação da teoria de Maxwell aos fenômenos luminosos recentemente investigados (o problema da radiação de corpo negro, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta, etc.), porém, sem invalidar os enormes sucessos obtidos pela teoria eletromagnética da luz anteriormente.

As ideias de Einstein forneceram as bases para uma nova questão: Se uma onda (campo eletromagnético) pode apresentar-se em determinadas situação como partículas, seria possível que partículas pudessem também ter uma natureza ondulatória?

O físico francês Louis de Broglie (1892 – 1987) foi um dos primeiros a tentar responder a esta questão, influenciado pelas ideias de seu irmão mais velho, Maurice de Broglie (1875 – 1960), que investigava o fenômeno de difração de raios X há muitos anos. Quando de Broglie

sugeriu que os raios X poderiam ser descritos como uma combinação de ondas e partículas, Louis propôs, como sua tese de seu doutorado, que o comprimento de onda do fóton, uma propriedade ondulatória, poderia ser associado ao seu momento linear, uma propriedade corpuscular, pela combinação das equações de Planck e Einstein. Assim,

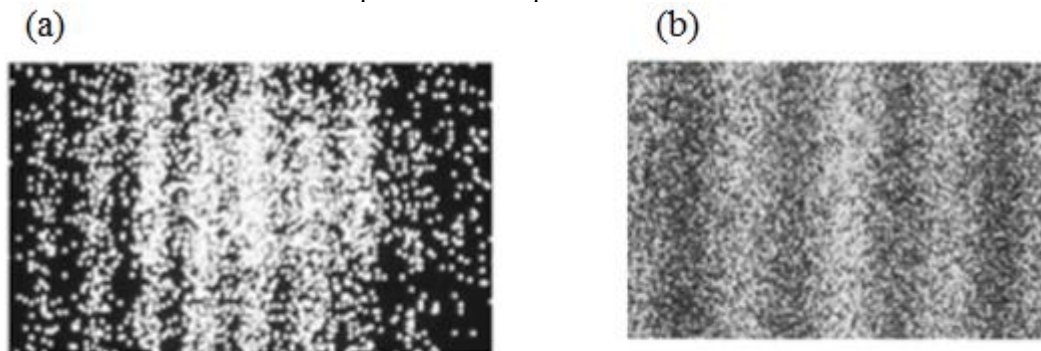
$$\begin{array}{l} (1) E = h.f = \frac{h.c}{\lambda} \\ (2) E = m.c^2 \end{array} \quad \longrightarrow \quad m.c = \frac{h}{\lambda}$$

Definindo o momento linear do fóton como $p=m.c$, ele obteve:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

A equação acima estabelece que a matéria (fotoelétrons, prótons ou nêutrons) não tem apenas energia e momento linear como característica intrínsecas, mas também um comprimento de onda característico. Louis sugeriu que se o experimento da dupla-fenda, idealizado por Young em 1801 para a luz, fosse realizado com feixe de fotoelétrons ou com outras partículas, o resultado seria um padrão de interferência idêntico ao resultado encontrado para a luz. As figuras 12a e 12b ilustram que a previsão de Louis de Broglie estava correta.

Figura 102 - (a) Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de luz; (b) Padrão de interferência construído no experimento de dupla-fenda utilizando um feixe de fotoelétrons



FONTE: Hobson (2013)

Em ambas figuras, podemos notar aspectos ondulatórios (padrão de interferência) e aspectos corpusculares (pequenos impactos localizados). A similaridade entre fótons e fotoelétrons tornou-se um mistério.

Esta interpretação dos fenômenos quânticos, atualmente conhecida como “Paradoxo Dualidade Onda-Partícula”, tanto para a luz quanto para a matéria, foi posteriormente

estabelecida no Princípio da Complementariedade de Niels Bohr de 1928. Este princípio afirma que:

A natureza da luz e da matéria é dual e os aspectos ondulatório e corpuscular não são contraditórios, mas complementares. Assim, as naturezas corpusculares e ondulatórias só podem ser detectáveis separadamente e surgem de acordo com o tipo de experiência proposta pelo cientista (HEWITT, 2007, p. 369).

Desta forma, em fenômenos como refração, difração, interferência, polarização, na experiência de dupla-fenda, a natureza evidenciada da luz é a ondulatória, ao passo que na fotoluminescência e nos efeitos fotoelétrico e Compton a natureza que ressalta é a corpuscular.

3.2.8 A Teoria Quântica de Campos – Uma possível resposta muito controversa

Os esforços da humanidade para compreender a natureza da luz contribuíram para aos estudos da estrutura da matéria. No entanto, a aceitação de que o Universo tem uma natureza dual está longe de ser uma unânime na comunidade científica. Pelo contrário, esta discussão é bastante controversa.

O próprio Einstein expressou sua discordância em relação a outros cientistas numa troca de cartas com seu amigo Michelle Besso em 1954, “[...] Todos estes 50 anos reflexão consciente não me trouxeram para perto da resposta à pergunta: “O que são os quantas de luz”? Atualmente, Tom, Dick e Harry pensam que eles sabem, mas eles estão errados” (EINSTEIN, 1954 apud HOBSON 2005).

Antes de discutirmos se o Universo tem uma natureza singular ou dual, vejamos resumidamente como a comunidade científica construiu os conceitos de campo e partículas.

Para construção do conceito de campo podemos citar principalmente as contribuições dos trabalhos de Isaac Newton, Michael Faraday, James C. Maxwell e Albert Einstein. Na década de 20, após a elaboração da Teoria da Relatividade Geral, pode-se afirmar que a comunidade científica concordava que todas as forças conhecidas estavam descritas em termos de campos clássicos, definidos unicamente como uma condição (estado) do próprio espaço (HOBSON, 2013).

Einstein teria expressado esta ideia da seguinte forma:

Antes de Maxwell, a realidade física [...] era pensada ser constituída de partículas de matéria [...] Após os trabalhos de Maxwell, a realidade física tem sido pensada como representação de campos contínuos, [...] e não compatíveis

com qualquer interpretação mecânica”. (EINSTEIN apud HOBSON 2013, p. 06),

Já a construção do conceito de partícula remota aos filósofos atomistas na Grécia Antiga até o desenvolvimento da chamada Física Quântica em 1930. Ironicamente, a equação central da Física Quântica para a estrutura da matéria, a equação não-relativística de Schroedinger, é uma equação de campo. No entanto, devido à chamada Interpretação de Copenhague, na qual $\Psi(x,t)$ foi interpretada como a probabilidade de que, no instante t , uma partícula estivesse na posição x ou de que alguma interação ocorresse com a partícula neste ponto, a equação de Schroedinger passou a tratar de partículas e não de campos (HOBSON, 2013).

É chamada Teoria Quântica de Campos – TQC – o desenvolvimento da equação de Schroedinger relativística, unindo a Teoria da Relatividade com princípios de Física Quântica, para descrição de campos eletromagnéticos quantizados. De acordo com a TQC, o “quantum” é definido como contáveis excitações de campos estendidos e a energia de um “quantum” ($E = h.f$) representa a energia adicionada a estes campos. Não existe fração do “quantum”, por isso ele é instantaneamente criado ou destruído. Por fim, ele está espacialmente estendido até o infinito, não existindo posição específica para o “quantum” (HOBSON, 2013).

O físico colaborador de maior destaque no desenvolvimento da TQC foi Dirac. Ele mostrou que a equação de Schroedinger era a versão não-relativística de uma equação relativística geral de campos, a qual ele denominou de “Equação de Dirac”. Assim, ele concluiu que nenhuma destas duas equações descreviam o comportamento partículas, somente de campos.

A TQC também tem como princípio geral que todos os campos são intrínsecos ao espaço, isto é, todos os campos já estão lá. Desta forma, elétrons, prótons, nêutrons, quarks e outras partículas (e anti-partículas), são definidos como “campos quantum de matéria”, ou simplesmente, “quantum de um campo fundamental” (HOBSON, 2013). Uma vez que todas estas partículas geram um padrão de interferência no experimento de dupla-fenda, conclui-se que este campo não pode ser somente um campo eletromagnético. Esse campo fundamental que dá origem a todas as partículas de matéria é comumente denominado “Campos de Matéria” ou “Campos Fermions” (HOBSON, 2004).

Recentemente, Hobson (2013) argumentou que a TQC poderia eliminar o paradoxo dualidade onda-partícula no experimento de dupla-fenda, pois é assumido que no Universo só existem campos. A estranha e estreita similaridade entre os efeitos produzidos por fótons e

elétrons ilustrada na seção anterior (Figuras 12a e 12b) poderia ser explicada por uma similaridade fundamental entre eles.

O padrão de interferência poderia ser explicado se assumirmos que os “quantuns” (elétrons, prótons, nêutrons ou fótons) são campos estendidos que passam pelas duas fendas por difração e, em seguida, sofrem interferência em diferentes pontos do espaço. Duas variações neste experimento foram feitas pelos cientistas. Na primeira, reduziram a intensidade de tal forma que cada “quantum” fosse emitido individualmente. Na segunda, ainda emitindo os “quantuns” individualmente, é deixado apenas uma única fenda aberta. Enquanto que na primeira situação o padrão de interferência permanece o mesmo, na segunda tem-se apenas uma única faixa brilhante alinhada com a fenda aberta, evidenciando que agora não há mais interferência (HOBSON, 2013).

Nas figuras 12a e 12b também podemos notar o que muitos físicos acreditam ser os aspectos corpusculares dos “quantuns”, inúmeros impactos pontuais, como se tivessem sido feitos por partículas. Os pequenos pontos brilhantes na figura 12a mostram que o “quantum” pode interagir localmente com átomos, mas isto não mostra que o “quantum” é uma partícula. Segundo Hobson (2013), um balão também pode interagir localmente com a ponta de uma agulha. Assim, a localização vista nas figuras 12a e 12b é uma característica do detector, que é feito de átomos localizados, mais do que “quantuns” localizados. Argumentos similares são utilizados para descrever a trajetórias de “partículas” em câmaras de bolhas.

Em suma, para Hobson (2013) o padrão de interferência nas figuras 12a e 12b confirmam que os “quantuns” são campos e excluem a possibilidade de serem partículas, enquanto que as interações pontuais podem ser explicadas tanto por campos como por natureza corpuscular. Portanto, poderíamos explicar todas as evidências experimentais citadas anteriormente assumindo que o “quantum” é um campo estendido que atravessa as fendas abertas.

Entretanto, é importante destacar que os apontamentos de Hobson (2013) não são aceitas totalmente dentro da comunidade científica. Por exemplo, Robert J. Sciamanda, cientista da Universidade da Pensilvânia Edinboro, ao comentar o artigo de Hobson (2013), afirma que se estendermos as ideias do autor chegaremos à conclusão de que não existem nem partículas nem campos. Para Sciamanda, a TCQ é um modelo matemático muito útil, mas com pouco ou nada faz para identificar um modelo para realidade ontológica (partículas, campos, ondas ou qualquer coisa que seja) da entidade descrita.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DA PESQUISA

Nosso trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, empírica, quase-experimental e com intervenção, pois buscamos na realidade observável os registros sobre os quais fizemos nossas análises qualitativas.

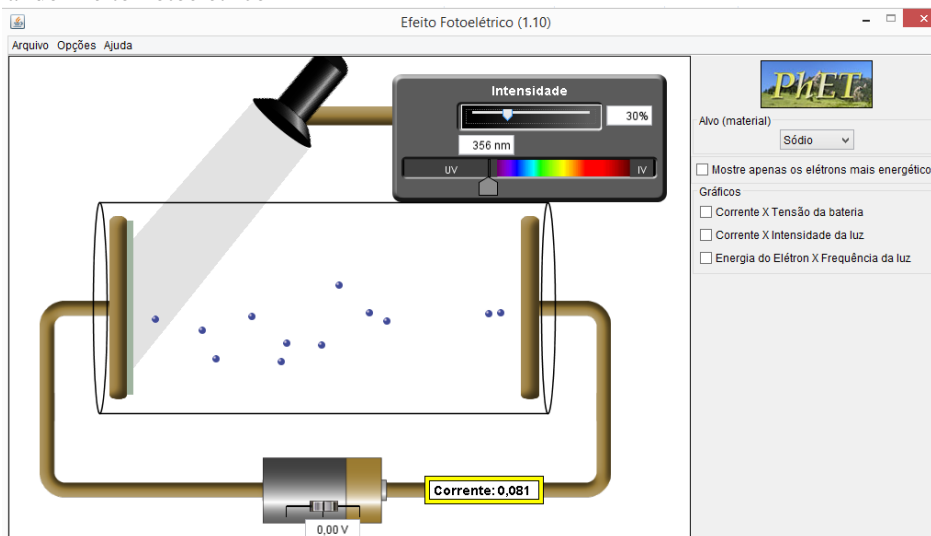
Dentro da abordagem qualitativa, utilizamos o delineamento de pesquisa do tipo empírica quase-experimental. Primeiro porque tínhamos somente um controle parcial sobre os fatores que afetam a validade interna da pesquisa. Em segundo lugar, porque não realizamos uma distribuição aleatória dos sujeitos, nem utilizamos grupos de controle para comparação, ou seja, trabalhamos com toda a população. Por último, a escolha deste tipo de delineamento se justifica devido à intervenção no processo de ensino-aprendizagem, sendo esta intervenção alvo de análises ao final de nosso trabalho.

4.1. Escolhendo a simulação computacional

Com base na discussão apresentada na seção 1.2, buscamos na *internet* simuladores computacionais do experimento do Efeito Fotoelétrico para futuro uso em nossa unidade de ensino. Os trabalhos de Steinberg (1996), Oberem e Steinberg (1999), De Leone e Oberem (2003) e McKagan (2008), culminaram em uma simulação computacional muito difundida entre os professores brasileiros e bastante presente na literatura de ensino de física, a qual está disponível no laboratório virtual gratuito PhET (*Physics Education Technology*) – *Interactive Simulations*¹⁵.

¹⁵ Disponível em: <http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric>. Acessado em 25 de setembro de 2014.

Figura 11- Ilustração da luz irradiada sobre a placa de metal e os fotoelétrons sendo ejetados na simulação computacional do Efeito Fotoelétrico



FONTE: Dados da pesquisa

A figura 1 ilustra esta simulação computacional. Nela, um feixe de luz de comprimento de onda igual a 358 nm é irradiado sobre uma placa de sódio, resultando na “ejeção” de fotoelétrons deste metal. A simulação também contém um circuito elétrico acoplado a um tubo de vácuo isolando as placas metálicas. A simulação permite que o usuário visualize e varie os valores da intensidade e o do comprimento de onda da luz emitida. Também é possível utilizar diferentes placas metálicas (sódio, platina, magnésio, etc.). O espectro eletromagnético mostrado junto ao cursor do comprimento de onda contextualiza o significado desta grandeza. No circuito ainda é possível visualizar o valor da corrente elétrica gerada, bem como alterar a diferença de potencial entre as placas. Por fim, à direita da simulação, é possível visualizar a construção instantânea de gráficos entre as variáveis que descrevem o fenômeno.

Para validar a escolha desta simulação para compor nossa unidade de ensino, utilizamos os critérios de seleção sugeridos por Macedo (2009): i) facilidade de utilização; ii) elevado grau de interatividade e iii) confiabilidade de origem.

A facilidade de utilização refere-se à avaliação das instruções sugeridas em forma de texto pela simulação. Tal elemento tem o objetivo de auxiliar os alunos a usar e interpretar os resultados visualizados pela simulação. No entanto, como será descrito em breve, em nossa proposta haverá um roteiro de atividades para utilização da simulação computacional bem como o professor estará presente em sala de aula responder às dúvidas dos alunos, logo, este critério foi de pouca importância. Porém, nos preocupamos em avaliar as informações direcionadas aos professores, muitas vezes descrito como “guia para o professor”.

A interatividade consiste na possibilidade do aluno manipular parâmetros, valores, variáveis, características das magnitudes e elementos que intervêm na animação. Como nosso tópico de ensino é o experimento do Efeito Fotoelétrico, buscou-se escolher simulações que permitissem visualizar de alguma forma as alterações na intensidade e o comprimento de onda da luz incidente, no número de fótons, no tipo de placa metálica, na diferença de potencial entre as placas e na energia cinética dos fotoelétrons emitidos.

A confiabilidade de origem é resultado de um trabalho árduo de programas de pesquisas para o desenvolvimento da simulação computacional, o que faz com que os erros conceituais não existam ou, na melhor das hipóteses, sejam desprezíveis.

Em nossa análise, a simulação disponibilizada no *Phet* pela Universidade do Colorado atendeu satisfatoriamente os critérios estipulados por Macedo (2009). No entanto, é oportuno destacar as limitações e simplificações do modelo físico que pressupõe esta simulação, uma vez que nela há possibilidade de se acrescentar ou não outras simplificações. Assim, ao usar a simulação, optamos pelas seguintes simplificações:

- Optamos por escolher a opção na qual os fotoelétrons são emitidos com a mesma energia cinética. Desta forma, após a incidência de luz acima da frequência de corte são mostrados apenas os fotoelétrons mais energéticos. Esta opção não altera o gráfico Intensidade x Corrente Elétrica, uma vez que a corrente elétrica é calculada baseada em todos os fotoelétrons.
- De acordo como modelo físico que pressupõe a simulação, os fótons com energias mais altas são mais propensos a liberar fotoelétrons, pois uma proporção maior dos fotoelétrons no metal tem energia de ligação menor do que a energia dos fótons. Portanto, à medida que aumenta a frequência, o número de fotoelétrons emitidos (e, portanto, a corrente elétrica) irá aumentar até que todos fótons estejam emitindo fotoelétrons.
- Na configuração padrão, a intensidade da luz é proporcional apenas ao número de fóton. Assim, ao aumentar a frequência além do ponto em que todos os fótons estão emitindo fotoelétrons (ver ponto anterior), o número de fotoelétrons emitidos (portanto, a corrente elétrica) ficará constante. Para isso, selecionamos no menu opções “mostrar número de fótons ao invés da intensidade”. Justificamos esta escolha a fim de não haver contradição entre os modelos físicos presentes no livro didático e na simulação.

- É assumido que todos os fotoelétrons são ejetados perpendicular à placa. Em um experimento real, os fotoelétrons são ejetados em todas as direções, necessitando de um campo elétrico para direcionar os fotoelétrons.
- São ignoradas questões avançadas na simulação, tais como potencial de contato, emissão termiônica e corrente inversa.

4.2. CONTEXTO ESCOLAR DA PESQUISA

4.2.1 O Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, campus Aquidauana

Os Cursos de Educação Profissional Técnica de Nível Médio Integrados em Edificações ou em Informática, foram implementados no IFMS, campus Aquidauana, no início do ano de 2011. Cada curso tem duração mínima sete semestres e são ofertados a estudantes que possuam certificado de conclusão do Ensino Fundamental, ou equivalente, e que pretendam realizar curso de educação profissional técnica de nível médio de forma integrada, conforme a legislação vigente¹⁶.

De 2011 até 2013 foram oferecidas 40 vagas para os ingressantes em cada curso, portanto, 80 vagas anuais. Já no ano de 2014, em virtude das melhorias em infraestrutura na instituição, foram disponibilizadas 80 vagas para o curso de Edificações (uma turma matutina e outra vespertina) e 40 vagas para o curso de Informática (matutino), totalizando 120 vagas anuais. Os projetos pedagógicos dos dois cursos (PPC) estabelecem alguns objetivos específicos em comum:

1. Desenvolver um currículo coerente com as demandas do mundo do trabalho atual, pautando-se nos novos conceitos de controle de qualidade de materiais ou processos.
2. Fomentar iniciativas de ensino baseadas em problemas reais, instigando a criatividade na abordagem de soluções.
3. Ensinar que, ética, atenção às normas técnicas e de segurança, redação de documentos técnicos, raciocínio lógico, iniciativa, criatividade e sociabilidade, são requisitos necessários para a formação de um bom técnico de nível médio (BRASIL, 2012, p. 12).

Como função profissional, o Técnico em Edificações auxilia na elaboração de projeto de edificações, atua na administração e no monitoramento das atividades de execução de estrutura, hidráulica, elétrica e de alvenaria, numa obra. O Técnico em Informática adquire conhecimentos para: configurar, administrar e monitorar equipamentos e serviços de redes e

¹⁶ Lei nº 11.892, de 29 de dezembro de 2008. Institui a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica, cria os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia, e dá outras providências.

sistemas operacionais, softwares aplicativos e computadores; prestar serviço de assistência técnica e manutenção em equipamentos de informática; prestar serviço de suporte em informática, auxiliar na elaboração de sistemas de software e desenvolver aplicações dinâmicas para web (BRASIL, 2012).

O profissional Técnico, seja em Edificações ou em Informática, deverá estar ancorado em uma formação com sólida base de conhecimento científico-tecnológico, relacionamento interpessoal, comunicação oral, pensamento crítico e racional, capacidade para resolver problemas de ordem técnica, capacidade criativa e inovadora, capacidade de gestão e visão estratégica em operações de sistemas empresariais. Além disso, esse profissional deve demonstrar responsabilidade, adaptabilidade, capacidade de planejamento, conhecimento de informática, agilidade, capacidade de decisão e consciência da necessidade de uma educação continuada.

4.2.2 A Disciplina de Física nos cursos Técnico em Edificações e Técnico em Informática do IFMS

A disciplina de Física está inserida na matriz curricular no eixo Ciências da Natureza Matemática e suas Tecnologias, dividida em seis etapas semestrais (Física 01, Física 02, ..., Física 6). A carga horária total da disciplina é a mesma em ambos os cursos, sendo um total de 360 h/a (horas-aula). Esta carga horária total é distribuída em três aulas semanais de 45 minutos cada, totalizando 60 horas aula por semestre. Como a carga horária total dos cursos é de 4600 h/a, podemos notar que o tempo de aula da disciplina de Física corresponde a 7,82% do tempo total, menor apenas que as disciplinas de Língua Portuguesa e Matemática, com 8,26% (380 h/a) do tempo total, cada uma.

Para o Curso Técnico em Edificações, a disciplina de Física é abordada durante os primeiros seis semestres e nos seis últimos no Curso Técnico em Informática. Uma vez que no momento em que a disciplina de Física 6 é ministrada os alunos já frequentam a instituição por cerca de 3 anos (edificações) ou 3 anos e meio (informática), esta diferença no momento de aplicação da proposta é praticamente irrelevante no sentido de produzir influências consideráveis entre o grupo piloto e o grupo de pesquisa. Assim, consideramos que os resultados que seriam obtidos com o grupo piloto seriam um *feedback* muito importante para aplicação com o grupo de pesquisa.

4.3. O GRUPO PILOTO

Por se tratar de uma pesquisa em uma área de ciências sociais, julgamos que fosse necessário a utilização de um grupo piloto para identificar possíveis obstáculos que surgiriam numa situação de coleta de dados.

Consideramos importante a oportunidade de trabalhar com o grupo piloto pelas seguintes razões e possibilidades: a) verificar a adequação temporal dos planos de aula, de execução do roteiro de atividades na simulação computacional e de realização das avaliações; b) avaliar a estrutura e a sequência de aulas propostas e, por fim, c) calibrar nossos instrumentos de coleta de dados, especialmente, a avaliação final de conhecimento.

Com relação à análise das respostas na avaliação final de conhecimento, tínhamos dois objetivos imediatos: 1) Identificar possíveis indícios de aprendizagem significativa e 2) Avaliar a confiabilidade das medidas por meio da Análise de Consistência Interna. Esta avaliação se justifica pois iremos comparar o desempenho dos estudantes em cada questão com o desempenho do grupo como um todo.

A análise de consistência interna de um teste tem por objetivo verificar o quanto de verdade existe nessa hipótese a respeito de determinado teste. [...] O pesquisador não pode usar um teste sem verificar a sua consistência interna. Sem essa etapa, a soma de escores atribuídos a itens particulares não pode ser feita e toda inferência obtida a partir desse escore total será sem significado (ROSA, 2008, p. 84).

Analizamos a confiabilidade de nossos instrumentos por meio da análise de fidedignidade. “A fidedignidade de um instrumento refere-se à estabilidade, à reprodutibilidade, à precisão das medidas com ele obtidas. Assim, um teste é fidedigno se suas medidas são acuradas e consistentes quando aplicado em tempos diferentes” (ROSA, 2013, p. 81). Como não é viável aplicar inúmeras vezes a mesma avaliação de conhecimento à mesma turma, nas mesmas condições, estima-se a fidedignidade por meio de cálculos estatísticos.

Utilizamos o valor do coeficiente Alfa de Cronbach para fazer essa estimativa. Nele é medida a correlação entre as respostas em um questionário através da análise das respostas dadas pelos respondentes, apresentando uma correlação média entre as perguntas. Assim, o coeficiente é calculado a partir da variância dos itens individuais e da variância da soma dos itens de cada avaliador de todos os itens de um questionário que utilizem a mesma escala de medição (ROSA, 2013).

Para este fim, seguimos os procedimentos também sugeridos por Rosa (2013)¹⁷. Segundo este autor, neste cálculo, valores de correlações (ou coeficientes de fidedignidade) de +1,00 indicam perfeita fidedignidade, enquanto que correlações próximas de 0,00 indicam ausência de fidedignidade. Correlações entre 0 e 1 indicariam níveis intermediários de fidedignidade. Na área de ensino, onde os dados são flexíveis e mutáveis, correlações da ordem de 0,70 são aceitáveis.

A avaliação final de conhecimento era composta de 13 questões diversificadas, sendo algumas de múltipla escolha, outras de resolução de exercícios algébricos e algumas dissertativas. Para cada questão respondida corretamente foi atribuído uma nota igual a 1,0. Para as questões respondidas parcialmente corretas não houve um valor de nota padrão, pois analisamos individualmente o raciocínio utilizado pelo aluno em cada questão.

4.4. OS SUJEITOS DA PESQUISA

O grupo piloto foi formado por 15 alunos do Curso Técnico Integrado em Informática do IFMS, campus Aquidauana, regularmente matriculados na disciplina de Física 6, no 1º semestre de 2014. Já a população pesquisada (aplicação da unidade de ensino para coleta de dados) foi formada por 16 alunos regularmente matriculados na disciplina de Física 6, do Curso Técnico Integrado de Nível Médio em Edificações, do IFMS, campus Aquidauana, regularmente matriculados na disciplina de Física 6, no 2º semestre do ano de 2014. Destacamos que o tema “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea”, especificamente a abordagem do Efeito Fotoelétrico, já faz parte da ementa do curso. Também ressaltamos que estas foram as únicas turmas que tiveram aulas de FMC durante o ano de 2014 na instituição de ensino. A fim de evidenciar formação do grupo piloto e do grupo da pesquisa, construímos o Quadro 2.

QUADRO 2- Descrição do grupo piloto e do grupo participante da coleta de dados

INFORMAÇÕES	GRUPO PILOTO	GRUPO DA PESQUISA
Curso Técnico Integrado em:	Informática	Edificações
Período	7º (último)	6º (penúltimo)
Ano/Semestre	2014/1	2014/2
Número de Alunos	15	16
Disciplina	Física 6	Física 6

¹⁷ Um roteiro exemplificativo para execução da análise de consistência interna de uma avaliação pode ser encontrado em Rosa (2008), páginas 84 a 87.

Os alunos terão suas identidades preservadas ao longo desta dissertação, assim, serão identificados pelos números de 1 a 16. É possível caracterizar o perfil do grupo de pesquisa como heterogêneo, isto é, nele encontramos alunos extremamente esforçados e comprometidos com as atividades propostas e até mesmo alguns com raciocínio lógico acima da média. No entanto, há também poucos alunos que, por algum motivo em específico, não se engajam nos estudos.

De uma maneira geral, segundo levantamentos internos da coordenação de curso para combate à evasão, a maioria dos alunos não se identifica com a proposta do Curso Técnico em Edificações, pois muitos pretendem ingressar em uma universidade, pública ou particular, ao final do ano de 2015, ao invés de seguir a carreira de técnico. Assim, grande parte dos alunos busca na instituição uma oportunidade que lhes possibilitem obter êxito no Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM.

4.5. ELABORAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

O tempo estimado para o desenvolvimento de nossa unidade de ensino foi de 12 aulas, incluindo as verificações da presença conceitos prévios e de aprendizagem dos conceitos novos.

Levando-se em consideração as orientações dos Parâmetros Curriculares do Ensino Médio - PCN+, esperava-se desenvolver as seguintes competências pelos alunos:

- Identificar como a teoria clássica do eletromagnetismo compreendeu o Efeito Fotoelétrico;
- Reconhecer o modelo corpuscular como o mais adequado para explicar o Efeito Fotoelétrico;
- Relacionar a solução para o Efeito Fotoelétrico com a solução proposta por Planck para o problema da radiação de corpo negro;
- Identificar as propriedades das funções do primeiro grau que permitem determinar a frequência mínima e a energia necessária para a ejeção dos fotoelétrons da placa de metal;
- Resolver problemas envolvendo o Efeito Fotoelétrico;

Considerando as contribuições do trabalho de Cardoso e Dickman (2012), investigamos os seguintes subsunçores em nossa avaliação de diagnóstico inicial: a) A estrutura da matéria

de acordo com o modelo atômico de Bohr-Rutherford (1913) e o conceito de elétron “livre” num metal; b) A definição clássica de onda (ou radiação) eletromagnética bem como suas características fundamentais (definição conceitual, frequência, comprimento de onda, velocidade, energia, intensidade, espectro eletromagnético, luz visível, etc); c) A conservação e transferência de energia num fenômeno físico e d) Unidades de medidas e manipulação de números com notação científica.

O livro didático utilizado pelos alunos na disciplina de Física 6 é denominado **Conexões com a Física**, volume 03 - 1ª Edição – Ed. Moderna, 2010, cujos autores são Blaidi Sant’Anna, Glorinha Martini, Hugo Carneiro Reis, Walter Spinelli. O autor propõe uma abordagem que possibilita o aluno a refletir sobre o conhecimento adquirido na escola, sentindo-se provocado a formular questões e hipóteses sobre o saber físico, estabelecendo relações entre o conhecimento científico e o cotidiano do estudante. O tópico Efeito Fotoelétrico é discutido no capítulo 17 deste livro.

Considerando os resultados da revisão bibliográfica e nossa experiência como professor da instituição, esperávamos três dificuldades específicas para aprendizagem significativa dos novos conceitos e desenvolvimento de uma visão científica que incorpore o conflito de teorias científicas. Primeiramente, citamos a pouca familiaridade que os alunos tinham em discutir situações em que havia um confronto entre teorias científicas. Observando a ementa de Física no curso, bem como os registros de planos de ensino, isto ocorreu somente em duas ocasiões em anos anteriores: no debate entre os modelos Geocêntrico *versus* Heliocêntrico (na disciplina de Física 1) e no debate entre as teorias do Calórico *versus* Cinética do Calor (na disciplina de Física 3).

Assim, deduzimos que seria necessária uma atenção especial para que os alunos percebessem que a hipótese de Einstein na interpretação da natureza da luz era verdadeiramente revolucionária. Para isto, tomamos muito cuidado para que os alunos entendessem que as evidências experimentais encontradas no Efeito Fotoelétrico por Philip Lenard, em 1902, foram explicadas de acordo como o modelo eletromagnético para a luz proposto por Maxwell.

A segunda dificuldade, também apontada pelo trabalho de Cardoso e Dickman (2012), se refere à manipulação de operações básicas de matemática com potência de dez ou divisões. Sobre este ponto, ressaltamos que tomamos um cuidado especial em detalhar estas operações matemática durante os momentos de resolução de exercícios na lousa.

A terceira dificuldade, também identificada no trabalho de De Leone e Oberem (2003), remete a falta de conhecimentos básicos dos estudantes acerca do modelo ondulatório da luz. Por isso, cerca de uma semana antes de aplicarmos nossa unidade de ensino potencialmente significativa, solicitamos que dois alunos preparassem um seminário sobre “Ondas Eletromagnéticas”. Os alunos A2 e A5 se propuseram a preparar tal seminário.

Após essas considerações, nossa unidade de ensino potencialmente significativa ficou estruturada da seguinte forma:

- i. Verificação da presença dos subsunçores para introdução do novo conteúdo;
- ii. Possível atividade de ensino para consolidação dos subsunçores;
- iii. Os modelos propostos para natureza da luz até a Era Pré-Física Quântica;
- iv. A descoberta, as previsões da Física Clássica e as evidências experimentais encontradas no Efeito Fotoelétrico;
- v. Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Primeira Parte;
- vi. A hipótese de disparo de Lenard para explicar o Efeito Fotoelétrico;
- vii. A descrição do modelo corpuscular de Albert Einstein para a luz como hipótese rival à hipótese de disparo de Lenard;
- viii. Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Segunda Parte;
- ix. Resolução de exercícios e utilização do mapa conceitual
- x. Rejeição da comunidade científica às ideias de Einstein e a descrição do Efeito Compton (1923) como fator decisivo para a aceitação pela comunidade científica das ideias de Einstein.
- xi. Princípio da Complementariedade de Bohr (1928);
- xii. Verificação de aprendizagem.

Na próxima seção apresentamos a metodologia de análise de dados escolhidos. Fundamentamo-nos no trabalho de Cardoso e Dickman (2012) e na Taxonomia Revisada de Bloom (2001) para classificar as respostas dos alunos em nossas avaliações e, assim, responder à nossa questão de pesquisa.

4.6. METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS CONSTRUÍDOS

4.6.1 A Metodologia de Análise de Dados proposta por Cardoso e Dickman (2012)

Para a coleta de dados e elaboração de registros foram utilizadas as repostas dos alunos na avaliação de diagnóstico inicial e na avaliação final de conhecimento. Seguimos a metodologia adotada por Cardoso e Dickman (2012) para analisar estes dados construídos.

Para análise da avaliação de diagnóstico inicial, Cardoso e Dickman (2012) definiram classes para grupos de resposta com determinada afinidade, identificando aqueles alunos que têm conhecimento prévio bem ou mal definido, de acordo com a teoria de Ausubel (2003). Portanto, investigamos se estão ou não bem definidos conceitos relacionados: (1) ao modelo atômico de Bohr-Rutherford; (2) às radiações eletromagnéticas; (3) ao sistema internacional de unidades e possíveis conversões de unidades e (4) à Conservação da Energia. As classes estipuladas pelos autores foram as seguintes:

- **Subsunçor Presente (SP):** agrupa alunos que detêm conhecimentos próximos ou iguais aos conceitos aceitos cientificamente.
- **Subsunçor Mal Definido (SMD):** agrupa alunos cuja resposta utiliza conceitos pertinentes à situação, porém, esses conceitos não são correlacionados corretamente entre si ou com a pergunta.
- **Subsunçor Ausente (SA):** agrupa os alunos que apresentaram conhecimentos muito distantes dos conceitos científicos, ou seja, não relacionaram, e nem mesmo mencionaram os conceitos implícitos relacionados ao fenômeno em questão. Também serão classificados nesta categoria aqueles alunos que simplesmente não responderam à pergunta.

Na avaliação final de conhecimento, verificamos se haviam indícios de aprendizagem significativa para os novos conceitos estudados. Cardoso e Dickman (2012) propuseram a categorização das repostas dos alunos da seguinte forma:

- **Conceitos Suficientes (CS):** para os alunos que responderam à questão de forma correta, isto é, cuja resposta é aquela aceita cientificamente.

Por exemplo: “*A função trabalho corresponde a energia mínima necessária para retirar um elétron do alvo metálico*”.

- **Conceitos Ausentes (CA):** para alunos que responderam à questão de tal forma que os conceitos utilizados na resposta diferem substancialmente dos conceitos científicos.

Por exemplo: “*De acordo com o modelo de Einstein, o aumento na intensidade da luz incidente aumentará a energia cinética dos fotoelétrons*”.

- **Conceitos Insuficientes (CI):** para alunos que responderam à questão parcialmente correta ou questões cuja resposta está errada por causa de erros de transformações de unidades de medidas ou manipulações algébricas”.

Por exemplo: “*De acordo com o modelo de Einstein, tanto o aumento na intensidade da luz como na frequência provoca um aumento na energia cinética dos fotoelétrons*”.

Estas foram as ferramentas de análise de dados definidas a priori em nosso projeto de pesquisa. No entanto, julgamos que esta única ferramenta impossibilitava uma análise do processo de ensino como um todo. Logo, decidimos que o uso da Taxonomia de Bloom Revisada contribuiria para revelar uma nova perspectiva sobre o uso de nossa unidade de ensino potencialmente significativa, possibilitando identificar um número maior de indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos.

Na sequência, apresentamos as Taxonomias de Bloom (original e revisada) e como a utilizamos para analisar nossos dados.

4.6.2 As Taxonomias de Bloom: Original e Revisada

A Taxonomia de Objetivos Educacionais de Bloom é um *framework* criado para classificar o que os professores, por meio de suas declarações escritas nos planos de aula, esperam e pretendem que os alunos aprendam como resultado de suas aulas. Ela foi criada em 1948, a pedido da Associação Norte Americana de Psicologia (*American Psychological Association*), no intuito de conceber um meio para facilitar a troca de provas (testes) entre várias universidades, criando, assim, um banco de testes que medissem os mesmos objetivos educacionais.

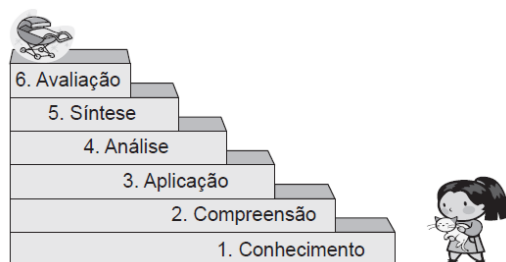
Participaram do projeto os professores/pesquisadores em avaliação da aprendizagem M.D. Englehart, E. J. Furst, W. H. Hill, D. R. Krathwohl e B. S. Bloom, mediante a direção deste último. Embora todos tenham colaborado significativamente para o desenvolvimento dessa taxonomia, ela é atualmente conhecida simplesmente como “Taxonomia de Bloom”

(BLOOM et al, 1956; KRATHWOHL, 2002; MAYER, 2002; FERRAZ e BELHOT, 2010, SILVA, 2013).

Bloom et al (1956) definiram três domínios específicos de desenvolvimento: cognitivo, afetivo e psicomotor. Embora todos os três domínios tenham sido amplamente discutidos e divulgados, em momentos diferentes e por pesquisadores diferentes, o domínio cognitivo é o principal enfoque do nosso trabalho. Este domínio tem como características estar relacionado ao aprender, dominar um conhecimento. Segundo Ferraz e Belhot (2010, p. 422), “o domínio cognitivo envolve a aquisição de um novo conhecimento, do desenvolvimento intelectual, de habilidade e de atitudes. Inclui reconhecimento de fatos específicos, procedimentos padrões e conceitos que estimulam o desenvolvimento intelectual constantemente”.

De acordo com a Taxonomia Original de Bloom (aquela elaborada em 1956), no domínio cognitivo foram definidas seis categorias (ou níveis) para os objetivos educacionais: **Conhecimento, Compreensão, Aplicação, Análise, Síntese e Avaliação**. As categorias estão ordenadas e hierarquizadas de acordo com o nível de complexidade, ou seja, do mais simples para o mais complexo e do concreto para o abstrato. Além disso, trata-se de uma hierarquia cumulativa dependente, isto é, deve-se dominar a categoria menos complexa para ascender à categoria imediatamente acima, pois cada uma utiliza habilidades e competências adquiridas nas anteriores (KRATHWOHL, 2002). Exemplificando, um aluno jamais poderá aplicar novos conceitos, em situações não familiares a ele, se ele não tomou conhecimento e nem compreendeu este novo conceito. A figura 13 ilustra o esquema hierárquico das categorias propostas por Bloom e seus colaboradores no ano de 1956.

Figura 123 - Representação hierárquica das categorias no Domínio Cognitivo propostas por Bloom et al (1956) para os objetivos educacionais



FONTE: FERRAZ e BELHOT, 2010, p. 424.

Com exceção à categoria **Aplicação**, todas as outras foram divididas em 20 (vinte) subcategorias. O Quadro 4 mostra a estrutura completa da Taxonomia Original de Bloom et al (1956).

QUADRO 3- Estrutura Completa da Taxonomia Original de Bloom et al (1956)

CATEGORIAS	SUBCATEGORIAS
1. CONHECIMENTO	1.1 Conhecimentos de especificidades: 1.1.1 Conhecimentos de terminologia 1.1.2 Conhecimentos de fatos específicos 1.2 Conhecimentos dos meios e significados que lidam com especificidades 1.2.1 Conhecimento de convenções 1.2.2 Conhecimento de tendências e sequências 1.2.3 Conhecimento de classificações e categorias 1.2.4 Conhecimento de critérios 1.2.5 Conhecimento de metodologia 1.3 Conhecimentos universais e abstrações em um campo 1.3.1 Conhecimento de princípios e generalizações 1.3.2 Conhecimento de teorias e estruturas
2. COMPREENSÃO	2.1 Traduções 2.2 Interpretações 2.3 Extrapolações
3. APLICAÇÃO	-
4. ANÁLISE	4.1 Análises de elementos 4.2 Análises de relações 4.3 Análises de princípios organizacionais
5. SÍNTESE	5.1 Produções de comunicação única 5.2 Produções de planos ou propostas de estrutura de operações 5.3 Derivações de uma estrutura abstrata de relações
6. AVALIAÇÃO	6.1 Avaliações em termos de evidências internas 6.2 Julgamentos em termos de critérios externos

FONTE: KRATHWOHL, 2002, p. 213.

Embora as categorias e subcategorias apresentadas no Quadro 4 sejam úteis, por exemplo, para classificar o tipo de questão que o professor coloca em uma avaliação¹⁸, ela não explicita, de forma coerente e objetiva, o que os alunos deverão ser capazes de realizar com o novo conhecimento. Diante disso, Bloom et al (1956) propuseram que os objetivos educacionais deveriam ser descritos obrigatoriamente por meio de verbos de ação e substantivos (conteúdo a ser ensinado) (FERRAZ e BELHOT, 2010). O Quadro 5 descreve como cada uma das seis categorias pode ser avaliada e estimulada a partir de estratégias definidas por verbos de ação específicos.

QUADRO 4- Descrição das categorias do Domínio Cognitivo por meio de verbos de ação específicos

CATEGORIAS	O QUE O ALUNO DEVERÁ SER CAPAZ DE FAZER?	VERBOS DE AÇÃO ESPECÍFICOS
1. CONHECIMENTO	Lembrar informações ou conteúdos previamente abordados	Identificar, descrever, nomear, rotular, reconhecer, reproduzir, seguir
2. COMPREENSÃO	Entender o significado; parafrasear um conceito	Resumir, converter, defender, parafrasear, interpretar, dar exemplos, comparar, inferir

¹⁸ Silva e Martins (2013), por exemplo, analisaram as questões de física presentes no Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM, de 1998 a 2011, e constatou que as provas têm privilegiado, significativamente, a categoria **Compreensão**, predominando a interpretação, a inferência e a comparação.

3. APLICAÇÃO	Usar a informação ou o conceito em uma nova situação	Criar, fazer, construir, modelar, prever, preparar
4. ANÁLISE	Dividir a informação ou o conceito em partes visando um entendimento mais completo	Comparar/contrastar, dividir, distinguir, selecionar, separar
5. SÍNTESE	Reunir ideias para formar algo novo	Categorizar, generalizar, reconstruir
6. AVALIAÇÃO	Fazer julgamentos sobre o valor	Avaliar, criticar, julgar, justificar, argumentar, respaldar

FONTE: SILVA, 2013, p. 24

Por exemplo, em uma avaliação, o professor estipula como objetivo educacional que os alunos deverão lembrar (verbo) as três Leis de Kepler (substantivo/conteúdo). No entanto, qual seria o modo mais adequado para avaliar se o aluno foi capaz de lembrar? Lembrar significa que ele conseguiria usar as leis de Kepler na resolução de um exercício algébrico?

Além de indagações deste tipo, as reformas curriculares, a incorporação de novas tecnologias e teorias ao campo educacional, as novas publicações sobre avanços psicopedagógicos e com inúmeros trabalhos práticos, levaram um grupo de especialistas, em 1995, agora sob a liderança de Krathwohl, pesquisador que também integrava o grupo de Bloom em 1956, a discutir a possibilidade de rever os pressupostos teóricos da Taxonomia de Bloom, buscando equilíbrio entre a estruturação da taxonomia original e as mudanças provocadas por avanços tecnológicos e de estratégias de ensino (KRATHWOHL, 2002; MAYER, 2002; FERRAZ e BELHOT, 2010, SILVA, 2013).

De acordo com a Taxonomia Original, a categoria **Conhecimento** inclui tanto verbo como substantivo. O substantivo (conteúdo a ser ensinado) estaria especificado nas subcategorias, enquanto que o aspecto verbal estaria incluído na definição dada ao conhecimento que o aluno deverá ser capaz de lembrar ou recordar após certo intervalo de tempo. Assim, “a categoria **Conhecimento** tinha uma descrição unidimensional enquanto que possuía uma natureza dual” (KRATHWOHL, 2002, p. 213). Esta anomalia foi eliminada na Taxonomia de Bloom Revisada – TBR – no ano de 2001, quando os pesquisadores decidiram que verbos e substantivos deveriam pertencer a dimensões separadas, nas quais os substantivos formariam a base para a Dimensão Conhecimento (algo a ser feito) e verbo para a Dimensão dos Processos Cognitivos (como fazer algo) (FERRAZ e BELHOT, 2010). Desta forma, foi atribuído um caráter bidimensional à taxonomia original.

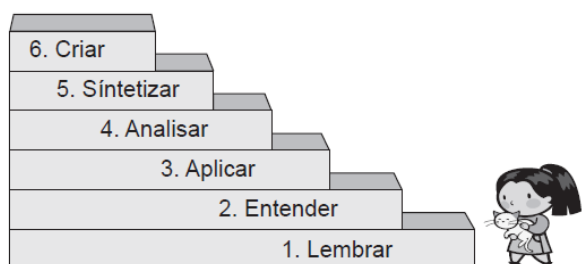
Outras mudanças também foram colocadas em prática, a saber:

1. Os aspectos verbais utilizados na categoria Conhecimento foram mantidos;
2. Houve uma renomeação das seis categorias, preferindo denominá-las por meio de verbos de ação específicos para cada categoria. Assim, a categoria

conhecimento foi renomeada para **Lembrar**; Compreensão foi renomeada para **Entender**; e Aplicação, Análise, Síntese e Avaliação, foram alteradas para a forma verbal **Aplicar, Analisar, Sintetizar e Criar**. 3. Houve uma inversão hierárquica entre as categorias Avaliação e Síntese (**Avaliar e Criar**); 4. Os nomes das subcategorias existentes foram alterados para verbos específicos no gerúndio. 5. Foi atribuída mais flexibilidade às propriedades cumulativas e interdependentes entre as categorias (FERRAZ e BELHOT, 2010, p. 427).

Dentre as mudanças ocorridas, vale a pena destacar o reconhecimento da necessidade de uma flexibilização entre as categorias do domínio cognitivo, visto que determinados conteúdos podem ser mais fáceis de serem assimilados a partir do estímulo pertencente a uma atividade mais complexa. Por exemplo, pode ser mais fácil entender um assunto após aplicá-lo e só então ser capaz de explicá-lo. Na Figura 14, encontra-se a nova categorização da TBR para a Dimensão dos Processos Cognitivos.

Figura 134- Categorização atual da Taxonomia de Bloom proposta por Anderson, Krathwohl e Airasian (2001)



FONTE: FERRAZ E BELHOT, 2010, P. 427.

No Quadro 6, encontra-se a descrição das novas categorização e identificação das subcategorias, agora em verbos específicos no gerúndio.

QUADRO 5- Descrição das categorias e identificação das subcategorias da Dimensão Processos Cognitivos por meio de verbos de ação e gerúndios, respectivamente

CATEGORIAS (o que fazer)	DESCRIÇÃO	SUBCATEGORIAS (como fazer)
1. LEMBRAR	Relacionada à retenção ou memorização de informações relevantes após certo intervalo de tempo	1.1 Reconhecendo (identificando) 1.2 Recordando (recuperando)
2. ENTENDER	Relacionada à atribuição de significado aos novos conteúdos. O aluno entende quando ele é capaz de construir conexões entre o novo conhecimento adquirido com seus conhecimentos prévios. O conhecimento novo é integrado à estrutura cognitiva.	2.1 Interpretando (clarificando, parafraseando, representando, traduzindo) 2.2 Exemplificando (ilustrando, esclarecendo) 2.3 Classificando (categorizando, subsumindo) 2.4 Sumarizando (abstraindo, generalizando) 2.5 Inferindo (concluindo, extrapolando, interpolando, prevendo) 2.6 Comparando (contrastando, mapeando)

		2.7 Explicando (construindo modelos)
3. APLICAR	Envolve usar procedimentos para realizar exercícios ou resolver problemas (situação nova)	3.1 Executando (realizando) 3.2 Implementando (utilizando)
4. ANALISAR	Envolve dividir o material em suas partes constituintes (importantes e não importantes), bem como determinar as inter-relações entre partes e com a estrutura.	4.1 Diferenciando (discriminando, selecionando, distinguindo, focalizando) 4.2 Organizando (encontrando coerência, integrando, estruturando, delineando, analisando) 4.3 Atribuindo (desconstruindo)
5. AVALIAR	Relacionada a fazer julgamentos baseados em critérios e padrões.	5.1 Checando (coordenando, detectando, monitorando, testando) 5.2 Criticando (julgando)
6. CRIAR	Significa colocar elementos juntos, com o objetivo de criar uma nova visão.	6.1 Generalizando (hipotetizando) 6.2 Planejando (desenvolvendo) 6.3 Produzindo (construindo)

FONTE: MAYER, 2002; FERRAZ E BELHOT, 2010

A TBR está baseada no princípio de que a escola pode ser expandida para incluir um gama maior de processos cognitivos. Quando refletimos criticamente sobre nossa prática e sobre nossa unidade de ensino potencialmente significativa, em diálogo também com trabalhos publicados na literatura, como o de Silva e Martins (2013), observamos que muitas vezes enfatizamos somente as categorias LEMBRAR, ENTENDER, e APLICAR. Levando-se em consideração o fato de que constatamos que há divergências entre os pesquisadores de ensino de física de que seria o modo adequado de verificar os indícios de aprendizagem significativa, gostaríamos de chamar atenção para uma descrição mais detalhada da categoria APLICAR e ressaltar sua relação direta com a Teoria da Aprendizagem Significativa – TAS - de Ausubel (2003).

De acordo com Mayer (2002), a categoria APLICAR consiste de dois processos cognitivos distintos: Executando, isto é, quando a tarefa é um exercício (tarefa familiar ao aluno), e Implementando, isto é, quando a tarefa é uma situação problema (tarefa não familiar ao aluno).

Executando (também denominado Resultando) ocorre quando um aluno aplica determinado procedimento em uma tarefa familiar. A aplicação das equações estudadas no experimento do Efeito Fotoelétrico na resolução de um exercício inédito, mesmo que este envolva interpretação, deve ser classificada neste tipo de processo cognitivo, pois, em última análise, o aluno estará simplesmente aplicando um algoritmo de resolução de exercícios, o qual já é familiar a ele desde as primeiras aulas de física no Ensino Médio (MAYER, 2002).

Implementando (também denominado Utilizando) ocorre quando um aluno aplica um ou mais procedimentos em uma tarefa não familiar. Por exemplo, dada uma inédita observação experimental envolvendo partículas subatômicas, na qual os resultados indicam a invalidade da Lei da Conservação da Energia, solicitar ao aluno que proponha uma solução para o problema (passível de testes experimentais) de tal forma que se mantém intacta a validade desta lei. Devemos notar que nesta tarefa, os alunos não apenas aplicam um procedimento, mas também dependem do entendimento conceitual do problema. Assim, diferente do processo cognitivo Executando, que depende quase totalmente da aplicação de um procedimento específico (somente a categoria APLICAR), o processo cognitivo Implementando depende de ambas categorias ENTENDER e APLICAR (MAYER, 2002).

Após estas explicações, devemos esclarecer que, de acordo com nossa interpretação da TAS, Ausubel (2003) propõe que a verificação dos indícios de aprendizagem significativa de um novo conceito deva ocorrer na categoria APLICAR, no processo cognitivo Implementando. No entanto, entendemos que, apesar da flexibilidade na interdependência entre as categorias e processos cognitivos, a análise do desempenho dos alunos nos processos cognitivos abaixo do nível Implementando fornecerá informações importantes sobre a estrutura de nossa unidade de ensino potencialmente significativa para o experimento do Efeito Fotoelétrico.

Conforme afirmado anteriormente, os aspectos relacionados ao substantivo (conteúdo) e ao verbo (ação) na antiga categoria Conhecimento, levaram os pesquisadores a dividir o conhecimento em dois tipos: (1) conhecimento como processo e (2) conhecimento como conteúdo assimilado, criando assim a Dimensão Conhecimento separada da Dimensão Processos Cognitivos. Na TBR, a Dimensão Conhecimento está subdividida em quatro subcategorias: Conhecimento Factuais; Conhecimentos Conceituais; Conhecimentos Procedimentais e Conhecimentos Metacognitivos. O Quadro 7 mostra a descrição de cada subcategoria na Dimensão Conhecimento.

QUADRO 6 - Descrição das categorias e identificação das subcategorias da Dimensão Conhecimento

DIMENSÃO CONHECIMENTO		
Categorias	Descrição	Subcategorias
A. Conhecimentos Factuais	Relacionados ao conteúdo básico que os alunos devem dominar, a fim de que consigam realizar e resolver exercícios ou problemas apoiados nesse conhecimento.	Aa. Conhecimentos de terminologia Ab. Conhecimentos de detalhes e elementos específicos
B. Conhecimentos Conceituais	Relacionados à inter-relação dos elementos básicos, num contexto mais elaborado que os estudantes seriam capazes de descobrir.	B.a Conhecimentos de classificação e categorização B.b Conhecimentos de princípios e generalizações

		B.c Conhecimentos de teorias, modelos e estruturas
C. Conhecimentos Procedimentais	Relacionados aos conhecimentos de “como realizar alguma coisa” utilizando método, critério, algoritmos, técnicas.	C.a Conhecimentos de habilidades específicas e algoritmos C.b Conhecimentos de técnicas específicas e métodos C.c Conhecimentos de critérios para determinar quando usar procedimentos apropriados
D. Conhecimentos Metacognitivos	(Refletir sobre o que se sabe) refere-se aos conhecimentos dos processos cognitivos e das informações sobre como manipular esses processos de forma eficaz.	D.a Conhecimentos de estratégias D.b Conhecimentos sobre tarefas cognitivas, incluindo conhecimentos contextuais e condicionais D.c Autoconhecimento

FONTE: KRATHWOHL, 2002; SILVA, 2013

Na nova estrutura proposta na TBR, as dimensões Conhecimento (substantivo/conteúdo) e Processos Cognitivos ficaram separadas, e isso possibilitou uma nova ferramenta de análise que tem como estrutura uma tabela bidimensional, denominada de Tabela Bidimensional da Taxonomia de Bloom (FERRAZ e BELHOT, 2010).

Na tabela bidimensional, a dimensão Conhecimento pertence à coluna vertical e a dimensão Processos Cognitivos à coluna horizontal. Os objetivos educacionais são classificados pela intersecção das duas dimensões em uma célula específica. É ressaltado que um mesmo objetivo educacional poderá ser inserido em mais de uma célula. No entanto, é recomendado, que para atingir o maior nível de Processo Cognitivo estipulado previamente pelo professor, que os níveis anteriores contenham algum objetivo educacional específico (MAYER, 2002; KRATHWOHL, 2002). A figura 15 ilustra uma situação hipotética na qual o professor classificou os objetivos educacionais de seu curso de acordo com a Tabela Bidimensional de Bloom.

Figura 145 - Tabela Bidimensional de Bloom preenchida com os objetivos educacionais para uma situação hipotética

Dimensão Processo Cognitivo	Dimensão Conhecimento			
	Factual	Procedimental	Conceptual	Metacognitivo
Lembrar	Ex. Objetivo 1		Ex. Objetivo 2	
Entender			Ex. Objetivo 2	
Aplicar			Ex. Objetivo 2	
Analisar			Ex. Objetivo 3	
Avaliar		Ex. Objetivo 3		
Criar				

FONTE: Adaptado SILVA, 2013, p. 37

É com base na Tabela Bidimensional da TBR que fizemos uma nova análise de nossa avaliação final de conhecimento, a fim de classificarmos os objetivos de aprendizagem propostos em cada questão. Em seguida, avaliamos até que ponto estes objetivos divergem da diretriz de avaliação de aprendizagem proposta pela TAS e, por fim, analisamos as respostas dos alunos participantes do grupo de pesquisa em cada uma destas questões. Assim, identificamos não apenas respostas certas ou erradas, mas também foi possível inferir até que nível de processo cognitivo o aluno alcançou por meio de nossa unidade de ensino potencialmente significativa.

No próximo capítulo serão apresentadas todas as atividades que compõem nossa unidade de ensino potencialmente significativa e que foi aplicada em sala de aula. Elas foram organizadas de acordo com a teoria da aprendizagem significativa, fazendo uso de HFC e utilização de simulação computacional. Discute-se também a metodologia de elaboração de cada etapa do produto, levando em conta seus objetivos e as relações com a teoria a que se propõe.

CAPÍTULO 5: UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA

Nesta seção apresentamos os materiais utilizados para compor nossa unidade de ensino potencialmente significativa, a saber: a avaliação de diagnóstico inicial; as duas partes do roteiro de atividades que os alunos usaram para o manuseio da simulação computacional; o mapa conceitualmente errôneo e a avaliação final de conhecimento. Por fim, anexamos as listas de exercícios utilizadas em nossa proposta.

5.1 AVALIAÇÃO DE DIAGNÓSTICO INICIAL - (01 AULA)

Questão 01) Com relação à estrutura do átomo, assinale verdadeiro (V) ou falso (F):

- a. () No átomo há espaços vazios.
- b. () O átomo é constituído de núcleo e eletrosfera.
- c. () Os fotoelétrons se situam no eletrosfera.
- d. () No núcleo encontram-se prótons e nêutrons.
- e. () A massa do elétron é aproximadamente igual à massa do próton
- f. () A carga negativa do átomo está confinada no seu núcleo.
- g. () O núcleo contém quase a totalidade da massa do átomo.
- h. () Os fotoelétrons movimentam-se ao redor do núcleo em órbitas definidas.
- i. () Átomos, no estado fundamental, têm números de prótons e fotoelétrons iguais.
- j. () Os fotoelétrons podem ser “arrancados” de um átomo.

Questão 02) Justifique o(s) item(s) falso(s) da questão anterior.

Questão 03) Explique por que os metais, em geral, são bons condutores de eletricidade?

Questão 04) Por que um fio de prata é melhor condutor de eletricidade do que um fio de cobre?

Questão 05) Com relação ao estudo de ondulatória, responda:

- a) Qual a propriedade fundamental das ondas, tanto mecânica como eletromagnéticas?
- b) A equação fundamental das ondas é $v = \lambda \cdot f$. Assim, podemos afirmar que o *comprimento de onda* e a *frequência da onda* são grandezas _____ proporcionais”.

Questão 06) O que é uma onda (ou radiação) eletromagnética?

Questão 07) O espectro eletromagnético é dividido geralmente em sete tipos de ondas (ou radiações) eletromagnéticas. Quais são elas?

Questão 08) Escreva em ordem crescente de frequência os tipos de radiações eletromagnéticas anteriormente citados.

Questão 09) A luz branca pode ser dividida em seis cores diferentes. Em ordem alfabética, elas são: alaranjada, amarela, azul, verde, vermelha, violeta.

Qual a cor de luz que tem o maior comprimento de onda?

R: _____

Qual a cor de luz que tem o menor comprimento de onda?

R: _____

Questão 10) As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade de $3,0 \cdot 10^8 \text{ km/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 90,5 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, em metros.

Dados: MHz = megahertz = 10^6 Hz $v = \lambda \cdot f$

Questão 11) Para cada uma das grandezas abaixo, escreva sua respectiva unidade de medida no sistema internacional:

- a) Velocidade → _____
- b) Período → _____
- c) Frequência → _____
- d) Comprimento de onda → _____
- e) Energia → _____

Questão 12) Converta as seguintes unidades de medidas. Utilize obrigatoriamente notação científica.

- a) 5,0 mm: _____ m
- b) 0,022 μm : _____ m

Questão 13) “Em um jogo de sinuca, o objetivo é colocar dentro da caçapa todas as bolas ímpares ou pares, para isso, todos os jogadores fazem uso de uma bola branca. Este jogo é muito praticado no Brasil e requer noções de física, mesmo que o jogador, enquanto jogue, não pense assim”.

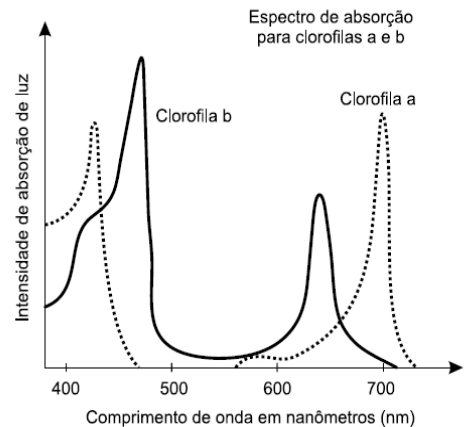
Considere uma sinuca que não ofereça atrito para as bolas e que um jogador decida acertar a bola branca em outra que está parada, com o intuito de colocá-la na caçapa. O jogador, com certa habilidade, dá uma tacada forte e, em seguida, a bola branca colide com a outra em “cheio”. Depois da colisão, a bola branca fica parada e a outra bola adquire certa velocidade, porém um pouco menor que a da bola branca antes da colisão. Utilizando a Lei de Conservação da Energia, explique esta situação.

Questão 14) O Pêndulo de Newton é um dispositivo muito utilizado para estudar as colisões entre objetos de mesma massa. Conforme pode ser visto na figura, ele é construído a partir de uma série de esferas metálicas (normalmente 5) adjacentes umas das outras. Suponha então que você desloque a primeira esfera até a altura 10 cm e a libere a partir do repouso. Então, você observa que a última esfera se eleva até a altura máxima de 9,5 cm. Utilizando a Lei de Conservação da Energia, explique esta situação.



Questão 15) (FUVEST-2013 – MODIFICADO) A tabela traz os comprimentos de onda no espectro de radiação eletromagnética, na faixa da luz visível, associados ao espectro de cores mais frequentemente percebidas pelos olhos humanos. O gráfico representa a intensidade de absorção de luz pelas clorofilas a e b, os tipos mais frequentes nos vegetais terrestres.

Comprimento de onda (nm)	Cor
380 – 450	Violeta
450 – 490	Azul
490 – 520	Ciano
520 – 570	Verde
570 – 590	Amarelo
590 – 620	Alaranjado
620 – 740	Vermelho



Baseado em: Tratado de Botânica de Strasburger, 36ª ed., Artmed, 2012.

Sendo $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$, note e adote:

- 1) Módulo da velocidade da luz no vácuo igual 3.10^8 m/s ;
- 2) Energia do fóton: $E=h.f$
 $h = \text{Constante de Planck} = 6,6.10^{-34}\text{ J.s}$
 $f = \text{frequência da radiação eletromagnética}$
- 3) O crescimento da planta é mais acentuado quando há mais absorção da energia radiante que vai intensificar a fotossíntese;
- 4) $v = \lambda.f$

Responda às questões abaixo, com base nas informações fornecidas na tabela e no gráfico.

a) Em um experimento, dois vasos com plantas de crescimento rápido e da mesma espécie foram submetidos às seguintes condições:

Vaso 1: exposição à luz solar

Vaso 2: exposição à luz verde

A temperatura e a disponibilidade hídrica foram as mesmas para os dois vasos. Depois de algumas semanas, verificou-se que o crescimento das plantas diferiu entre os vasos. Em qual dos vasos o crescimento da planta foi maior? Justifique sua resposta.

b) Qual a energia E do fóton de luz vermelha cujo comprimento de onda é 660 nm.

Elaboramos esta avaliação de diagnóstico inicial com intuito de atender à essência da teoria de aprendizagem de Ausubel, ou seja, conhecer a estrutura cognitiva dos alunos, verificar a clareza e estabilidade dos conceitos prévios relevantes (subsunoçores) nela e, somente após esta confirmação, apresentar novas informações. O tempo de 01 hora/aula (45 minutos) foi estimado para sua aplicação.

As duas primeiras questões da avaliação se referem à estrutura da matéria. Analisamos os subsunoçores sobre o modelo de átomo de Bohr-Rutherford, bem como ideias sobre existência de partículas subatômicas e suas propriedades. Nas questões 03 e 04 buscamos identificar se o aluno possui e/ou relaciona o conceito de condutibilidade elétrica e térmica em metais com a movimentação dos elétrons.

Da questão 05 à questão 11, analisamos os subsunçores sobre conceitos relacionados às ondas eletromagnéticas, tais como: propriedade fundamental de uma onda, relação entre comprimento de onda e frequência, definição de onda eletromagnética, características das ondas eletromagnéticas, divisão do espectro eletromagnético, luz visível, equação fundamental de uma onda. Em especial, na questão 11, tem-se um exercício razoavelmente simples: emprego da equação fundamental de onda. No entanto, o interesse maior nesta questão está em identificar a habilidade do aluno em converter unidades de medidas e na manipulação de números com notação científica.

Na questão 11 procuramos identificar se o aluno conhece satisfatoriamente as unidades de medida no sistema internacional das principais grandezas relacionadas a uma onda, enquanto que na questão 12 busca-se reconhecer se o aluno conhece significado dos prefixos mili e micro. Nas questões 13 e 14 buscamos encontrar subsunçores sobre a lei de conservação e transferência de energia. Entende-se que esses conceitos e princípios serão fundamentais para a aprendizagem significativa do fenômeno, especialmente quando for discutida a equação do Efeito Fotoelétrico, a qual relaciona a energia cinética do elétron emitido com a energia do fóton e com a função trabalho do material. Por fim, na questão de número 15 buscamos verificar o desempenho dos alunos em interpretar e entender novas informações, bem como também obter informações através de gráficos.

5.2 ATIVIDADE DE ENSINO PARA CONSOLIDAÇÃO DE SUBSUNÇORES (02 AULAS)

Uma vez que poderíamos encontrar qualquer resultado na avaliação de diagnóstico inicial, elaboramos uma estratégia de ensino caso muitos alunos não apresentassem os conceitos prévios relevantes necessários para ancoragem dos novos conceitos. Acreditamos que a maneira mais rápida e eficaz para realçar e/ou promover os subsunçores na estrutura cognitiva dos alunos seria aquela na qual o professor faz a correção da avaliação de diagnóstico inicial junto aos alunos em sala de aula. Nesta situação, o professor pôde fazer os comentários e enfatizar as informações mais importantes acerca dos quatro temas abordados na avaliação.

A discussão inicial das questões dar-se-á em cinco etapas nesta aula, são elas:

1. Discussão das questões 01 a 04. Estas questões abordam a estrutura da matéria. Assim, primeiramente foram explicitados os conceitos sobre a estrutura do átomo de Bohr-

Rutherford (1913), existência de partículas subatômicas, suas propriedades, atração entre elétron e núcleo e sua relação com a condutibilidade elétrica em metais.

2. Discussão das questões 11 e 12. Nestas questões foram explicitadas as unidades de medidas no sistema internacional de unidades (SI) para as principais grandezas relacionadas a uma onda. Já na questão 12 mostramos a maneira correta de escrever os prefixos mili e micro em notação científica bem como operações com números com potência de dez

3. Discussão das questões 13 e 14. Nestas questões foram explicitados os conceitos relacionados à Conservação de Energia. Utilizamos o experimento denominado “Pêndulo Interrompido” para exemplificar a sequência de transferência e conservação de energia na situação apresentada. Também utilizamos a situação simples de uma bola de tênis que perde altura após uma queda para exemplificar a realização de trabalho por uma força não conservativa.

4. Discussão questão 15. Nesta questão discutimos com os alunos a interpretação do gráfico apresentado e a resolução de um exercício que envolve a apresentação de conceitos desconhecidos. Nesta questão também foi dada ênfase à manipulação de números com potência de 10.

5. Seminário. Dois alunos apresentaram, em cerca de 20 minutos, um seminário preparado com uma semana de antecedência ao início da unidade de ensino, sobre o tema “Ondas Eletromagnéticas”. Em seguida o professor corrigiu as questões de números 05 a 10. Como tarefa para aula seguinte, preparamos uma lista contendo 13 exercícios (tarefa 1) a fim consolidar os subsunçores referentes às “Ondas Eletromagnéticas”.

5.3 OS MODELOS PROPOSTOS PARA NATUREZA DA LUZ ATÉ A ERA PRÉ-FÍSICA QUÂNTICA (01 AULA)

Em nossa proposta, a aprendizagem significativa de conceitos de FMC deve-se somar ao enfoque histórico do tema abordado. Acreditamos que esse tipo de discussão mais aprofundada dos problemas enfrentados pelos modelos da Física Clássica no início do século XX e os debates das soluções apresentadas pela Física Clássica e por essa “nova Física” deva ser a porta de entrada para introdução de tópicos de FMC. Por isso, julgamos que, após a consolidação dos subsunçores necessários, deveríamos fazer um breve resgate histórico dos diversos modelos propostos para a natureza da luz até o ano de 1900.

Remetendo ao referencial teórico aqui adotado (Teoria da Aprendizagem Significativa – TAS), este conhecimento sobre os diversos modelos propostos para natureza da luz posteriormente seria fundamental, pois ele serviria de ancoradouro para introdução de novos conceitos de Física Quântica, tais como: paradoxo dualidade onda-partícula; princípio da complementariedade de Bohr; princípio da incerteza de Heisenberg; comprimento de onda de uma partícula; entre outros.

Na retrospectiva história da construção dos modelos corpusculares e ondulatórios propostos para a luz até o final do século XIX foi dada ênfase aos resultados do experimento da fenda dupla de Thomas Young, em 1801, por consideramos a sua importância crucial para o fortalecimento teórico do modelo ondulatório para a luz. Também foi apresentado um pequeno vídeo¹⁹ de demonstração. O vídeo foi recortado no tempo de 1 minuto e 45 segundos, pois a sequência do vídeo trata de outros assuntos não referentes a esta aula. A parte selecionada do vídeo ilustra de forma dinâmica quais eram os resultados esperados de acordo com os modelos corpuscular e ondulatório para o experimento da fenda dupla quando fosse realizado com um feixe de luz.

Buscava-se neste momento que os alunos tenham em sua estrutura cognitiva, de forma clara e estável, que ao final do século XIX a luz era considerada um campo eletromagnético contínuo por unanimidade pela comunidade científica. Este conhecimento sobre a natureza da luz ao final do século XIX é necessário para que os alunos entendam por que a proposta de Albert Einstein foi amplamente rejeitada pela comunidade científica por cerca de 15 anos.

Por fim, os alunos também assistiram os primeiros 12 minutos do vídeo “História da Eletricidade – Episódio 03: Revelações e Revoluções²⁰”. O trecho deste vídeo mostra os aspectos históricos que envolveram a confirmação experimental de Hertz da existência das ondas eletromagnéticas. O objetivo da exibição deste vídeo novamente foi a consolidação na estrutura cognitiva dos alunos a visão de mundo dos cientistas ao final do século XIX.

Como tarefa para aula seguinte, os alunos entregariam, por escrito, a resposta à seguinte questão: “*O que é o Efeito Fotoelétrico? Cite 03 aplicações tecnológicas de nosso cotidiano que faz uso desse fenômeno*”.

¹⁹ Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KVJUTQlaO-M>, acessado em 30 de setembro de 2014.

²⁰ Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Dju8lQW4488>>, acessado em 20/10/2014.

5.4 INTERPRETAÇÕES INICIAIS DO EFEITO FOTOELÉTRICO (01 AULA)

Esta aula foi realizada na sala de informática da instituição.

No intuito de evidenciar a aplicabilidade tecnológica resultante dos estudos do experimento do Efeito Fotoelétrico, o professor leu algumas respostas da tarefa solicitada na aula anterior, na qual foi requerida uma definição do Efeito Fotoelétrico bem como três exemplos de aplicações leram dois textos apresentados nas páginas 370 e 371 do livro didático, intitulados “As máquinas fotográficas digitais e o chip CCD (dispositivo de carga acoplada)” e “O Efeito Fotoelétrico no cotidiano”, respectivamente. O primeiro texto exemplifica como esse fenômeno é largamente empregado em sensores e câmeras digitais enquanto que no segundo texto é explicado como funciona um sensor LDR (resistência dependente de luz), dispositivo utilizado, por exemplo, para o acionamento automático do sistema de iluminação pública.

Na sequência foi discutido o experimento do Efeito Fotoelétrico conceitualmente. Para isso, o professor comentou as respostas dos alunos à questão solicitada na aula anterior (“*O que é o Efeito Fotoelétrico? Cite 03 aplicações tecnológicas que faz uso desse fenômeno que estão presentes no cotidiano*”). Logo após, foi destacado quando e por quem este fenômeno foi observado pela primeira vez e estudado de modo aprofundado. Por fim, o professor discutiu detalhadamente as principais previsões da Física Clássica para o experimento do Efeito Fotoelétrico realizado por Philip Lenard, em 1902, a saber:

1. A ocorrência do Efeito Fotoelétrico deve estar relacionada unicamente ao valor da intensidade de luz incidente.
2. O Efeito Fotoelétrico deve ocorrer para todos os valores de frequências (ou comprimentos de onda) da radiação incidente.
3. Um número grande fotoelétrons deve ser emitido, pois a onda eletromagnética se espalha pela superfície.
4. O Efeito Fotoelétrico deve demorar a ocorrer após a incidência da radiação eletromagnética.

O próximo passo foi o uso da simulação computacional²¹. Cabe observar que o *download* da simulação computacional em todos os computadores foi feito previamente à aula.

²¹ Disponível em: http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric. Acessado em 30/09/2014.

O professor neste momento ajudou os alunos na interpretação do roteiro ou na manipulação da simulação, porém, ele não forneceu as respostas aos alunos para as questões propostas no roteiro.

5.5 ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - 1ª PARTE (01 AULA)

Este roteiro tem o objetivo de orientar os alunos no desenvolvimento das atividades sobre o efeito fotoelétrico. Nesta atividade, utilizaremos uma simulação computacional para relacionar as propriedades do fenômeno em questão.

Introdução à simulação

Abra a simulação no local indicado pelo professor.

- (a) Identifique na simulação como podemos alterar a intensidade da luz;
- (b) Identifique na simulação como podemos alterar o comprimento de onda;
- (c) Localize na simulação o amperímetro, onde está escrito “corrente: 0,000”;
- (d) Localize a pilha e identifique a maneira pela qual podemos alterar sua tensão;
- (e) Identifique no lado direito da simulação, onde podemos mudar o tipo de placa de metal que está dentro da ampola de vidro. As opções são: sódio, zinco, cobre, platina, cálcio e magnésio;

ATIVIDADES:

Agora daremos início à execução da simulação. Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 0 %,
- O comprimento de onda está em 601 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

ATIVIDADE 01:

1. Encontre a opção de alterar a intensidade de luz. Altere o valor da intensidade da luz para 20% e observe o que ocorre.
2. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro?
R: _____
3. Altere o valor da intensidade de luz para 40% e observe o que ocorre.

4. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

5. Altere o valor da intensidade de luz para 60% e observe o que ocorre.

6. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

7. Altere o valor da intensidade de luz para 80% e observe o que ocorre.

8. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

9. Altere o valor da intensidade de luz para 100% e observe o que ocorre.

10. Qual a intensidade da corrente elétrica que está marcando no amperímetro agora?

R: _____

11. Após a execução destas 10 etapas, qual conclusão você obteve?

12. Mantendo a intensidade de luz igual a 100%, altere a voltagem da bateria para diversos valores e verifique sua influência na ocorrência do efeito fotoelétrico. Qual conclusão você obteve em relação à 1ª Lei de Ohm ($U = R.i$)?

ATIVIDADE 02

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 10 %,
- O comprimento de onda está em 850 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

1. Encontre a opção para alterar o comprimento de onda da luz. **Diminua bem lentamente o valor do comprimento de onda** até o momento em que algum elétron é “ejetado”. Qual o valor do comprimento de onda neste instante?

R: _____

2. Qual a importância deste valor para o fenômeno?

3. Altere o valor do comprimento de onda para 350 nm. Qual mudança você observou na rapidez dos fotoelétrons?

4. Altere o valor do comprimento de onda para 199 nm. Qual mudança você observou na rapidez dos fotoelétrons?

5. Após a execução destas 04 etapas, qual conclusão que você pode inferir?

6. Escreva novamente sua conclusão, porém, utilizando uma nomenclatura que envolva o conceito de energia.

ATIVIDADE 03

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 10 %,
- O comprimento de onda está em 301 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.

1. No lado direito da simulação, selecione a opção “**gráfico corrente x intensidade de luz**”.
2. Observe os fotoelétrons por 05 segundos.
3. Aumente o valor da intensidade de luz para 50 % e observe os fotoelétrons por 05 segundos.

4. Agora aumente o valor da intensidade de luz para 100 % e observe os fotoelétrons por 05 segundos.

5. Em sua opinião, **a rapidez dos fotoelétrons** aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma?

6. Aumente novamente a intensidade de luz de 0% a 100% e observe os fotoelétrons ejetados.

Em sua opinião, **a quantidade de fotoelétrons** aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma?

7. Observe o gráfico no lado direito da simulação. Com base no gráfico observado, qual tipo de relação matemática há entre a corrente elétrica e a intensidade de luz? **Justifique sua resposta.**

Neste momento de nossa unidade de ensino, a simulação computacional visava primeiramente contribuir para execução dos princípios da Diferenciação Progressiva e Reconciliação Integrativa da TAS. A execução da 1ª Parte da simulação computacional possibilitava que os alunos observassem duas características muito importantes do Efeito Fotoelétrico que foram relatadas por Philip Lenard em 1902: a não dependência da intensidade de luz para ocorrência do efeito e a influência da frequência de luz na rapidez dos fotoelétrons ejetados da placa metálica. Nas aulas seguintes, quando seria discutida a aplicação do modelo corpuscular de Einstein para explicar o Efeito Fotoelétrico, esperava-se que progressivamente fosse atribuído novos significados a esse conhecimento e, assim, este seria capaz de servir como ancoradouro para os conceitos de fóton e função trabalho de placa metálica.

Em segundo lugar, a comparação entre as “previsões da Física Clássica” e os “resultados experimentais inesperados” que são encontrados na utilização na 1ª Parte da simulação computacional, forneceram os subsídios teóricos para que os alunos percebam que os cientistas tinham duas opções após publicação dos resultados de Philip Lenard: 1) Buscar uma explicação para os resultados inesperados dentro da teoria de Maxwell e 2) Buscar um novo modelo para

natureza da luz (resgate do modelo corpuscular). Este conhecimento foi necessário para o desenvolvimento de uma visão de ciência que enfatizasse a interpretação das evidências experimentais e não simplesmente os dados experimentais por si só, isto é, uma visão que mostrasse que é possível vários cientistas observarem o mesmo fenômeno e interpretá-lo de maneiras totalmente diferentes.

Com relação à execução do roteiro de utilização da simulação computacional, primeiramente, o professor auxiliou os alunos a identificar as variáveis envolvidas na simulação. Em seguida, ele comentou as principais simplificações da simulação. Logo após, os alunos, sozinhos, executaram as atividades propostas.

O roteiro de atividades foi elaborado para auxiliar o aluno a perceber gradualmente a influência que cada variável exerce no fenômeno. As atividades foram entregues de maneira sequencial, isto é, o professor entregou ao aluno a atividade 02 somente após este terminar a atividade 01, e assim por diante.

Apresentamos a seguir o objetivo para cada atividade presente nesta primeira parte do roteiro:

Atividade 01:

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Enunciar que a variação na intensidade da luz não é um fator determinante para o início da ocorrência do fenômeno.
- Enunciar que a bateria não é um fator determinante para ocorrência do fenômeno.

Atividade 02:

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Enunciar que o Efeito Fotoelétrico só ocorre abaixo de um comprimento de onda específico (ou acima de uma frequência específica).

Atividade 03:

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Enunciar que, somente abaixo do comprimento de onda de corte, a corrente elétrica é diretamente proporcional à intensidade.

Ao final da aula o professor recolheu os roteiros de atividades para posterior correção. Tais atividades foram entregues aos alunos devidamente corrigidas antes da próxima aula. Como tarefa para aula seguinte, os alunos escreveram um texto no qual descreveram o aparato virtual do experimento do Efeito Fotoelétrico, bem como construíram uma tabela onde era possível comparar as previsões do modelo ondulatório e as conclusões obtidas nas três atividades propostas no roteiro.

5.6 INTERPRETAÇÕES DA FÍSICA CLÁSSICA PARA O EFEITO FOTOELÉTRICO E A PROPOSTA DO MODELO CORPUSCULAR DE ALBERT EINSTEIN PARA A LUZ - (02 AULA)

Inicialmente o professor fez, por meio da tarefa entregue pelos alunos, uma comparação entre as previsões da Física Clássica e os resultados experimentais encontrados no experimento do Efeito Fotoelétrico pelo físico Philip Lenard em 1902. Neste momento, o professor realçou que estas são possivelmente as mesmas conclusões obtidas pelos alunos na utilização da simulação computacional na aula anterior. São elas:

1. O Efeito Fotoelétrico só ocorre a partir de uma determinada frequência mínima;
2. A partir do momento em que o fenômeno começa a acontecer, a quantidade de cargas emitidas pela placa metálica é proporcional à intensidade da luz incidente;
3. Para outras frequências abaixo do valor mínimo o efeito não ocorre, qualquer que seja a intensidade da luz incidente.

Em seguida, o professor discutiu a “Hipótese de Disparo” de Lenard (1902) para explicar os resultados inesperados do experimento do Efeito Fotoelétrico. Nesta hipótese, é sugerido que não deve haver um processo de transferência de energia da luz incidente para os fotoelétrons, ou seja, a luz apenas dispararia o elétron. Desta forma, nenhuma das previsões do modelo ondulatório estaria incorreta.

Logo após, o professor apresentou as características do modelo corpuscular para luz proposto por Einstein como hipótese rival à “Hipótese de Disparo” para interpretação dos resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico, explorando a relação entre a hipótese de Planck (1900) para o problema da radiação do corpo negro com a revolucionária proposta de Einstein, porém ressaltando as diferenças entre elas.

Também foi apresentado o conceito de fóton, energia do fóton, intensidade de luz, o valor da constante de Planck e sua unidade de medida, função trabalho, frequência de corte (ou

comprimento de onda de corte). Foi dada uma atenção especial às relações entre energia do fóton com a frequência e o comprimento de onda da radiação. Em seguida, foi utilizada a Lei de Conservação da Energia para equacionar o fenômeno. Por fim, o professor explicou as conclusões obtidas por Philip Lenard em 1902 utilizando o modelo corpuscular para a luz.

Neste momento, o professor não impôs as ideias de Einstein como “verdadeiras”, mas como uma explicação alternativa para as mesmas evidências experimentais encontradas. Acreditamos que esta forma de apresentar o conteúdo pudesse contribuir para humanização do processo de construção de teorias científicas e desmistificar a crença de que elas são imediatamente abandonadas perante dados experimentais discordantes.

5.7 ROTEIRO DE ATIVIDADES – UTILIZANDO A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - 2ª PARTE (01 AULA)

ATIVIDADE 04

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 0 %,
- O comprimento de onda está em 235 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.
- Na barra superior “*opções*” **marque a opção** “*mostre os fótons*”.

1. Procure na barra superior “*opções*” e escolha a opção “*mostrar fótons*” (fótons). Em seguida, diminua lentamente a intensidade de luz até 0%. **Depois aumente novamente lentamente a intensidade de luz até 100%.**

2. Com base em suas observações, o que é a *intensidade da luz* de acordo com o modelo corpuscular?

3. Aumente a intensidade de luz para 50%. Na barra superior “*opções*” **desmarque a opção** “*mostre os fótons*”. Observe o movimento dos fotoelétrons por certo tempo. Com base em sua observação, os fotoelétrons “arrancados” têm energias cinéticas diferentes? Se sim, justifique a causa dessa diferença de energia cinética.

4. Reduza o comprimento de onda para 199 nm. A energia cinética dos fotoelétrons “arrancados” aumentou, diminuiu ou permaneceu a mesma?

5. Utilizando a **Lei de Conservação da Energia**, explique de onde provém a energia cinética dos fotoelétrons.

6. Quando diminuimos o valor do comprimento de onda da luz, a energia luminosa (a energia dos fótons) aumenta, diminui ou não se altera?

R: _____

7. A energia dos fótons e o comprimento de onda da luz são grandezas diretamente proporcionais? **JUSTIFIQUE SUA RESPOSTA.**

8. A energia dos fótons e a frequência da luz são grandezas diretamente proporcionais? **JUSTIFIQUE SUA RESPOSTA.**

9. Descreva resumidamente de que maneira o valor do comprimento de onda (λ) interfere na energia do fóton e na energia cinética do elétron.

11. Altere o valor do comprimento de onda para 552 nm. No menu opções, selecione “*mostre fótons*”. Explique detalhadamente por que nenhum elétron está sendo “ejetado” da placa de metal.

ATIVIDADE 05

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 50 %,
- O comprimento de onda está em 152 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.
- Na barra superior “*opções*”, **opção “*mostrar fótons*” não está selecionada.**
- **Desmarque todos os gráficos.**

1. Altere o material da placa, de sódio para platina. Observe o movimento dos fotoelétrons “arrancados”.

2. Para os mesmos valores de intensidade de luz e comprimento de onda, a energia cinética dos fotoelétrons “arrancados” do sódio e da platina é diferente ou permanece igual?

R: _____

3. Qual dos dois materiais tem maior facilidade de ejetar fotoelétrons quando são irradiados por uma luz com as características escolhidas acima?

R: _____

4. Altere o valor de comprimento de onda para 204 nm.

5. Alterando os seis tipos de metais disponíveis, para quais deles os fotoelétrons são “arrancados”?

R: _____

6. Explique por que para a platina, na situação anterior, o fenômeno não ocorre.

7. A energia do fóton foi transferida para quais formas de energia?

ATIVIDADE 06

Certifique-se que a simulação apresente os seguintes valores:

- A intensidade está em 50 %,
- O comprimento de onda está em 400 nm,
- Tensão na pilha elétrica 0,00 V,
- A placa de metal é sódio.
- Na barra superior “*opções*”, **opção “*mostrar fótons*” não está selecionada.**

6. Altere o valor da voltagem da pilha para - 2,00V e observe os fotoelétrons ejetados.

7. Note que nas placas de sódio apareceram os sinais de + e -, indicando que as placas estão carregadas positiva e negativamente.

8. Descreva o que aconteceu.

11. Explique por que a distância percorrida pelos fotoelétrons mudou.

12. Altere o valor do comprimento de onda para 287 nm e observe os fotoelétrons ejetados.

13. Explique por que os fotoelétrons não atingem a outra placa?

14. Por que a distância percorrida não é a mesma para todos os fotoelétrons?

Novamente a simulação computacional visava contribuir para execução dos princípios da Diferenciação Progressiva, Reconciliação Integrativa e Consolidação da TAS. A execução da 2ª Parte da simulação computacional possibilitava novas situações nas quais os alunos busquem explicações utilizando recursivamente as características do modelo corpuscular de Einstein, estudadas na aula anterior. Em outras palavras, pressupomos que isto levasse os alunos a uma tentativa de reorganização de sua estrutura cognitiva (processo assimilação de novos conceitos), possibilitando que os novos conceitos se relacionassem de maneira não-substantiva e não-arbitrária com os subsunçores.

No começo da aula, o professor explicou que nessa aula seria executada a 2ª Parte do Roteiro de Utilização da Simulação Computacional (atividades 04, 05 e 06). Novamente, o papel do professor auxiliou os alunos em dúvidas com relação à interpretação da tarefa a ser executada ou com alguma dificuldade de utilização da simulação. As atividades foram novamente entregues de maneira sequencial.

Apresentamos a seguir o objetivo para cada atividade presente nesta segunda parte do roteiro:

Atividade 04

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Compreender que o ganho de energia cinética do elétron é proveniente da energia do fóton.
- Compreender que a energia do fóton está relacionada com o comprimento da luz;
- Compreender que há uma dependência entre as energias cinéticas dos fotoelétrons com o comprimento de onda da luz.
- Compreender que a energia do fóton é inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz e diretamente proporcional à frequência.

Atividade 05

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Compreender que o tipo de metal influencia na energia cinética dos fotoelétrons.
- Compreender que para arrancar os fotoelétrons do metal, parte da energia do fóton é consumida para liberar o elétron.

- Equacionar a Lei de Conservação da Energia para o Efeito Fotoelétrico.

Atividade 06

Ao final desta atividade o aluno deverá:

- Identificar que, quando há uma voltagem negativa na bateria, há uma força elétrica que se opõe ao movimento inicial dos fotoelétrons.
- Compreender que a função trabalho não é a mesma para todos os fotoelétrons.

Após o término da execução do roteiro o professor comentou as respostas com os alunos. Neste momento o professor buscou elucidar as dúvidas dos alunos e ressaltar os aspectos importantes do fenômeno.

O professor utilizou o restante da aula para resolver, na lousa, exercícios do livro didático. Como tarefa para aula seguinte, os alunos entregaram, por escrito, as resoluções de uma lista de exercícios (tarefa 2) e as resoluções de exercícios do livro didático.

5.8 RESOLUÇÃO DE EXERCÍCIOS; MAPA CONCEITUAL E A REJEIÇÃO DA COMUNIDADE CIENTÍFICA DAS IDEIAS DE EINSTEIN (01 AULA)

Inicialmente o professor resolveu na lousa o seguinte exercício:

Os postes de iluminação contem lâmpadas ligadas a um circuito que possui uma célula fotossensível. Quando a luz do dia acaba, a corrente gerada pelo Efeito Fotoelétrico é encerrada, acionando outro circuito para acender a luz que iluminará a rua.

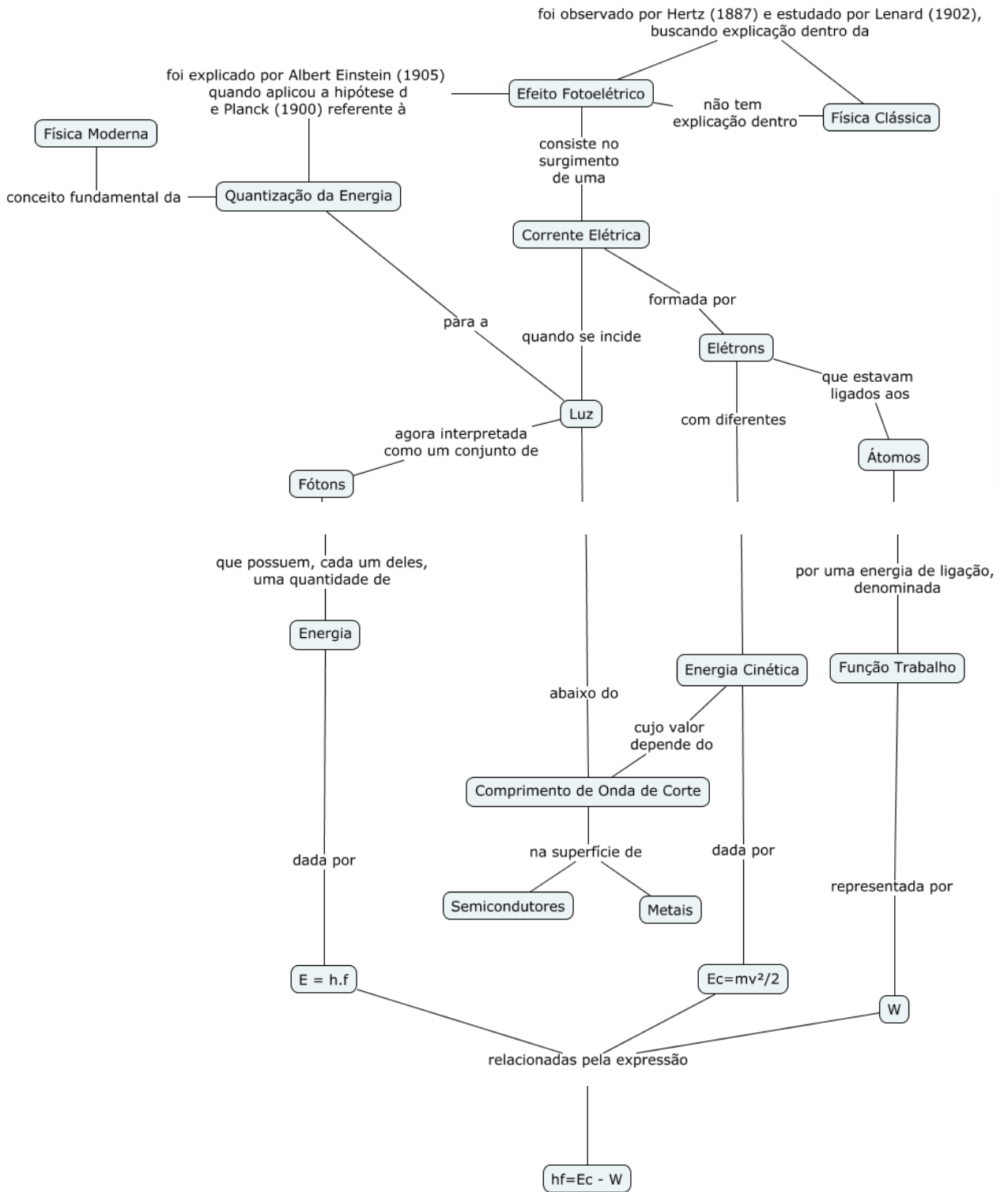
Sendo o valor da constante de Planck igual a $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ e considerando que a luz ultravioleta provoque na célula fotossensível o Efeito Fotoelétrico e que tenha a frequência de $8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, responda:

a) Qual o valor da energia, em joules, de cada fóton?

b) Se o trabalho (W) necessário para arrancar o elétron da célula fotossensível é $2,3 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, encontre o valor da energia cinética máxima com que o elétron foi ejetado.

Na sequência, o professor entregou aos alunos o “mapa conceitualmente errado” sobre o Efeito Fotoelétrico.

Figura 156 - Mapa conceitualmente construído para que os alunos identificassem os erros conceituais presentes



O mapa conceitual ilustra os conceitos e suas possíveis inter-relações. Os alunos deveriam, individualmente, identificar os erros conceituais presentes no mapa conceitual. Nesse

sentido, esperava-se que os alunos ao manipularem seus novos conhecimentos na realização desta atividade, promoveriam a Diferenciação Progressiva e a Reconciliação Integrativa. A primeira seria estimulada a partir do momento que o aluno precisaria diferenciar e distinguir o significado dos novos conceitos abordados. Já a segunda seria estimulada quando o professor ressaltasse as inter-relações entre estes diversos conceitos.

Por fim, o professor fez, junto com os alunos, a leitura de pequenas citações de físicos e historiadores de Ciências, como Millikan, Planck e Klassen, nas quais poderia ser evidenciada a resistência que a comunidade científica levantou contra a hipótese de “quantum de luz”, mesmo após a realização do experimento de Millikan em 1916. Buscou-se neste momento ampliar a visão dos alunos com relação ao papel da experimentação na Ciência, isto é, mostrar que os experimentos têm uma importância fundamental dentro da Ciência, porém os resultados e interpretações destes são fontes de longos e intensos debates dentro da comunidade científica.

Como tarefa para aula seguinte, os alunos deveriam entregar na aula seguinte as resoluções dos exercícios da tarefa 3.

5.9 EFEITO COMPTON (1921): A ACEITAÇÃO DA COMUNIDADE CIENTÍFICA DAS IDEIAS DE EINSTEIN E PRINCÍPIO DA COMPLEMENTARIEDADE DE BOHR (01 AULA)

Inicialmente o professor discutiu o gráfico linear da equação do Efeito Fotoelétrico, a partir do qual foram identificados os valores de frequência de corte, a constante de Planck e a energia necessária para remoção dos fotoelétrons da placa de metal.

Em seguida descreveu superficialmente o Efeito Compton e a maneira como Compton tentou interpretá-lo, utilizando as ideias de Einstein. O professor comentou que as ideias de Compton também sofreram inúmeros ataques dentro da comunidade científica. Entretanto, após várias comprovações experimentais de que tanto a energia como o momento linear do “quantum de luz” e do elétron estavam sendo conservados, a comunidade científica, e até mesmo Bohr, começou a aceitar o conceito de “quantum de luz”.

Por fim, o professor apresentou aos alunos o “Princípio da Complementariedade de Bohr”. Buscou-se neste momento evidenciar em quais fenômenos a luz pode ser interpretada como onda e em quais fenômenos o modelo corpuscular é o mais adequado.

5.10 VERIFICAÇÃO DE APRENDIZAGEM (01 AULA)

A avaliação seria realizada a partir de 13 questões, explorando as relações entre as variáveis, diferentemente da forma em que elas foram apresentadas. As questões foram escolhidas levando-se em conta as tecnologias que fazem uso do Efeito Fotoelétrico, definição dos novos conceitos, explicações de acordo com o modelo corpuscular, previsões para fenômeno, testagem dos erros mais frequentes neste conteúdo de acordo com Steinberg (1999), mitos envolvendo o estudo do Efeito Fotoelétrico e exercícios presentes nos exames para o ingresso no ensino superior.

01. Cite 02 (dois) exemplos de aplicações tecnológicas atuais que lançam mão dos conhecimentos científicos provenientes do estudo do experimento do efeito fotoelétrico.

02. Descreva a concepção atual que a comunidade científica tem sobre a natureza da luz. Cite dois exemplos que sustentam sua afirmação.

03. Explique o conceito físico de “função trabalho” de uma placa metálica.

04. (ITA – 2009) Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa a emissão de fotoelétrons. Para que ocorra a emissão de fotoelétrons do mesmo material, basta que se aumente (m)

- a) a frequência da luz.
- b) a intensidade da luz.
- c) o comprimento de onda da luz.
- d) a intensidade e a frequência da luz.
- e) a intensidade e o comprimento de onda da luz.

05. Justifique as afirmativas falsas:

1. No efeito fotoelétrico podemos utilizar a 1ª Lei de Ohm da eletricidade ($U = R.i$), pois a corrente de fotoelétrons é diretamente proporcional à tensão da bateria.

2. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a energia transportada por um fóton.

3. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a quantidade de fótons que há no feixe de luz.

4. O fóton é uma partícula carregada eletricamente.

5. A energia cinética de um fotoelétron pode ser aumentada se aumentarmos também o valor do comprimento de onda.

06. Justifique as afirmativas falsas:

1. A teoria de Einstein de 1905 para Efeito Fotoelétrico foi uma extensão natural da teoria de Planck de 1900, a qual Einstein adotou e aplicou para a natureza da luz.
2. O principal aspecto da teoria de Einstein do Efeito Fotoelétrico foi dar uma explicação para os experimentos que mostravam que a energia cinética dos fotoelétrons ejetados dependia linearmente da frequência de luz incidente, mas era independente da intensidade de luz.
3. Os resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico são inexplicáveis sem a hipótese do fóton.
4. A verificação final da teoria de Einstein foi fornecida pela experiência de Millikan.

07. A energia de um fóton de frequência f é dada por $E = h.f$, em que h é a constante de Planck. Qual a frequência e a energia de um fóton de luz, cujo o comprimento de onda é igual a 5000 \AA ?

Dados:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ \AA} = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$$

08. (UFMG – 2007) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando fotoelétrons passam de um nível de maior energia para o outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde. Sejam λ_{verde} o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e E_{verde} a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente, $\lambda_{\text{vermelho}}$ e E_{vermelho} .

Considerando-se essas informações, é CORRETO afirmar que

- a) $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- b) $E_{\text{verde}} > E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$
- c) $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} > \lambda_{\text{vermelho}}$
- d) $E_{\text{verde}} < E_{\text{vermelho}}$ e $\lambda_{\text{verde}} < \lambda_{\text{vermelho}}$

09. Sabe-se que incidindo uma radiação eletromagnética de comprimento de onda igual 400 nm sobre uma placa metálica de sódio ocorre a “emissão” de fotoelétrons. Porém, se trocarmos a placa metálica por outra que seja feita de platina, o efeito já não ocorre. Qual a explicação de Einstein para esta observação experimental?

10. (FUVEST – 2012) Em um laboratório de física, estudantes fazem um experimento em que a radiação eletromagnética de comprimento de onda de 300 nm incide em uma placa de sódio, provocando a emissão de fotoelétrons. Os fotoelétrons escapam da placa de sódio com energia cinética máxima $E_c = E - W$, sendo E a energia do fóton da radiação e W a função trabalho da placa de sódio. A energia de cada fóton é dada por $E = hf$, sendo h a constante de Planck e f a frequência da radiação. Determine:

- a) a frequência f da radiação incidente na placa de sódio.
- b) a energia E de um fóton dessa radiação.
- c) a energia cinética máxima E_c de um elétron que escapa da placa de sódio.

5.11 TAREFA 01

01. (UFV-MG) A energia E de um fóton de uma onda eletromagnética de frequência f é dada pela equação $E = h \cdot f$, em que h é a Constante de Planck. Sabe-se também que a capacidade de penetração de uma onda eletromagnética aumenta com a energia do fóton. O diagrama abaixo ilustra a localização relativa, no espectro eletromagnético de algumas radiações conhecidas.



É correto afirmar que:

- as ondas de rádio têm maior capacidade de penetração que os raios x porque possuem maior frequência.
- os raios gama têm maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque possuem menor frequência.
- a radiação visível tem menor capacidade de penetração que a radiação micro-ondas porque possui menor frequência.
- a radiação infravermelha tem menor capacidade de penetração que os raios x por que tem menor frequência.
- a radiação visível tem maior capacidade de penetração que a radiação ultravioleta porque tem menor frequência.

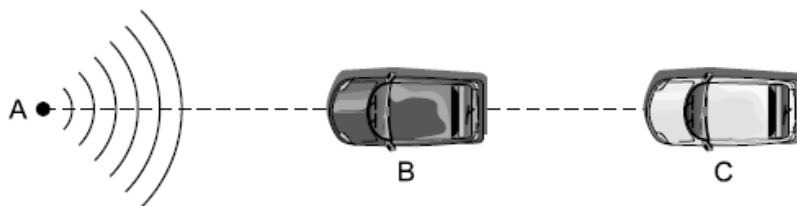
02. (UFABC)



Na tirinha, vemos Calvin transformado em raio X vivo. Esse tipo de onda eletromagnética tem frequência entre 10^{17} a 10^{19} Hz e foi descoberta em 1895 por Wilhelm Röntgen. Como todas as ondas eletromagnéticas, os raios X viajam pelo vácuo com a velocidade de $3 \cdot 10^8$ m/s. Considere dois raios X, com frequência $f_1 = 1,5 \cdot 10^{18}$ Hz e $f_2 = 3,0 \cdot 10^{19}$ Hz. A razão entre os comprimentos de ondas desses raios $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$, no vácuo, vale:

- a) 0,05 b) 0,50 c) 2,00 d) 4,50 e) 20,00

03. Alfredo, um jovem motorista, está posicionado no ponto A, indicado no esquema abaixo, no instante em que aciona o controle remoto visando destravar as portas de seu carro, estacionado em C. Entre as posições A e C está estacionado, porém, um outro veículo B, mas, mesmo assim, Alfredo consegue sucesso em abrir seu automóvel.



Levando-se em conta o contexto acima, assinale a alternativa correta:

- a) As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa das radiofrequências, e “contornam” o veículo B principalmente por refração.
- b) As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa da radiofrequência, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.
- c) As ondas emitidas pelo controle remoto são mecânicas, situadas na faixa dos ultrassons, e “contornam” o veículo B principalmente por refração.

d) As ondas emitidas pelo controle remoto são mecânicas, situadas na faixa dos ultrassons, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.

e) As ondas emitidas pelo controle remoto são eletromagnéticas, situadas na faixa dos Raios X, e “contornam” o veículo B principalmente por difração.

04. Descreva os seguintes fenômenos ondulatórios:

- a) Reflexão;
- b) Refração;
- c) Difração;
- d) Ressonância;
- e) Polarização;
- f) Interferência.

05. Baseando-se em sua resposta à questão 04, responda: *Quais destes fenômenos podem ocorrer com radiações eletromagnéticas?* Dê pelo menos 01 exemplo no cotidiano que corrobore sua afirmação.

06. (UFC) Analise as assertivas abaixo e a seguir indique a alternativa correta.

I. Fotoelétrons em movimento vibratório podem fazer surgir ondas de rádio e ondas de luz.

II. Ondas de rádio e ondas de luz são ondas eletromagnéticas.

III. Ondas de luz são ondas eletromagnéticas e ondas de rádio são ondas mecânicas.

- a) Somente I é verdadeira.
- b) Somente II é verdadeira.
- c) Somente III é verdadeira.
- d) Somente I e II são verdadeiras.
- e) Somente I e III são verdadeiras.

07. Um professor de Física que ministrava a primeira aula sobre Ondas dava exemplos de ondas eletromagnéticas. Ele dizia: “São exemplos de ondas eletromagnéticas as ondas de rádio, a luz, as ondas de radar, os raios X, os raios γ . Um aluno entusiasmado completou a lista de exemplos, dizendo: “Raios α , raios β e raios catódicos”.

Pode-se afirmar que

- a) pelo menos um exemplo citado pelo professor está errado.
- b) todos os exemplos citados pelo professor e pelo aluno estão corretos.
- c) apenas um exemplo citado pelo aluno está errado.
- d) os três exemplos citados pelo aluno estão errados.

e) há erros tanto nos exemplos do professor quanto nos do aluno.

08. (UDESC) – Analise as afirmações abaixo, com relação às ondas eletromagnéticas.

I. Os raios gama são radiações eletromagnéticas de frequência maior do que a luz visível.

II. As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que se propagam, no ar, com velocidade maior do que as ondas de rádio.

III. Os campos elétrico e magnético em uma radiação infravermelha vibram paralelamente à direção de propagação da radiação.

Assinale a alternativa correta.

a) Somente as afirmativas I e III são verdadeiras.

b) Somente a afirmativa II é verdadeira.

c) Somente a afirmativa III é verdadeira.

d) Somente as afirmativas II e III são verdadeiras.

e) Somente a afirmativa I é verdadeira.

09. (FUVEST) A energia de um fóton de frequência f é dada por $E = h.f$, em que h é a constante de Planck. Calcule a frequência e a energia de um fóton de luz, cujo comprimento de onda é igual a 500nm ?

Dados:

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$1\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$$

Resposta: $6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ e $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

10. Admita que ondas de rádio de frequência igual a $1,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ estejam sendo enviadas da Lua para a Terra por um grupo de astronautas tripulantes de uma missão satélite. Sabendo que as ondas de rádio se propagam com velocidade de módulo igual a $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ e que a distância da Lua à Terra é de $3,6 \cdot 10^5 \text{ km}$, aproximadamente, calcule:

a) o tempo gasto pelas ondas no trajeto da Lua à Terra;

b) o comprimento de onda dessas ondas.

Resposta: a) 1,2 s b) 200 m

11. (UFT) – Neste diagrama, está representado o espectro de ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo.

02. Suponha que você construiu um experimento tal que a intensidade de luz é diferente de zero, mas a o alvo metálico ainda não emite fotoelétrons. Quais das seguintes ações poderiam fazer o alvo metálico começar a emitir fotoelétrons?

- Aumentar a intensidade da radiação incidente.
- Diminuir a intensidade da radiação incidente.
- Aumentar o comprimento de onda.
- Diminuir o comprimento de onda.
- Aumentar a frequência da radiação incidente.
- Diminuir a frequência da radiação incidente.
- Aumentar a voltagem da bateria.
- Diminuir a voltagem da bateria.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma maior função trabalho.
- Trocar o alvo por um outro material que tem uma menor função trabalho.

03. O que causa a emissão de fotoelétrons de um alvo metálico quando determinada radiação eletromagnética incide sobre ele?

- a) A força exercida sobre os fotoelétrons pela bateria.
- b) A intensidade da radiação incidente.
- c) Ambos (a) e (b).
- d) Nem (a) e nem (b).

04. Se você construiu um experimento onde fotoelétrons estão sendo emitidos de uma placa metálica por causa de um feixe de luz incidente, assinale **verdadeiro** ou **falso**.

- Mantendo a condições do experimento, todos os fotoelétrons emitidos terão as mesmas energias cinéticas.
- A função trabalho dos metais pode ter valor diferente para diferentes fotoelétrons.
- A energia dos fótons que incidem na placa metálica deve ser menor que a função trabalho do metal.
- Os fotoelétrons emitidos com altas energias cinéticas são aqueles que estavam mais fracamente ligados no metal.

5.13 TAREFA 3

01. O efeito fotoelétrico, explorado em sensores, células fotoelétricas e em outros detectores eletrônicos de luz, refere-se à capacidade da luz de retirar fotoelétrons da superfície de um metal. Quanto a este efeito, pode-se afirmar que:

- a) a energia dos fotoelétrons ejetados depende da intensidade da luz incidente.
- b) a energia dos fotoelétrons ejetados é discreta, correspondendo aos quanta de energia.
- c) a função trabalho depende do número de fotoelétrons ejetados.
- d) a velocidade dos fotoelétrons ejetados depende da cor da luz incidente.
- e) o número de fotoelétrons ejetados depende da cor da luz incidente.

02. (UFMG – 2007) Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando fotoelétrons passam de um nível de maior energia para o outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDS são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde.

Sejam λ_{verde} o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e E_{verde} a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente, $\lambda_{vermelho}$ e $E_{vermelho}$.

Considerando-se essas informações, é CORRETO afirmar que

- a) $E_{verde} > E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$
- b) $E_{verde} > E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$
- c) $E_{verde} < E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$
- d) $E_{verde} < E_{vermelho}$ e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$

03. (UFMS-2003) Ondas de rádio e raios X estão se propagando no vácuo. As ondas de rádio possuem comprimento de onda $\lambda_r = 3,0 \text{ m}$ e os raios X, $\lambda_x = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}$. Sejam: E_r a energia dos fótons da onda de rádio e E_x a energia dos fótons dos raios X e v_r e v_x , respectivamente, suas velocidades de propagação. Com base nessas informações, é correto afirmar que:

- a) $E_x = E_r$ e $v_x = v_r$
- b) $E_x > E_r$ e $v_x < v_r$
- c) $E_x > E_r$ e $v_x = v_r$
- d) $E_x < E_r$ e $v_x = v_r$
- e) $E_x < E_r$ e $v_x > v_r$

04. (UNICAMP-2005) O efeito fotoelétrico, cuja descrição por Albert Einstein está completando 100 anos em 2005 (ano internacional da Física), consiste na emissão de fotoelétrons por um metal no qual incide um feixe de luz. No processo, “pacotes” bem definidos de energia luminosa, chamados fótons, são absorvidos um a um pelos fotoelétrons do metal. O valor da energia de cada fóton é dado por $E = h.f$, onde $h = 4.10^{-15} eV.s$ é a chamada constante de Planck e f é a frequência da luz incidente. Um elétron só é emitido do interior do metal se a energia do fóton absorvido for maior que uma energia mínima. Para os fotoelétrons mais fracamente ligados ao metal, essa energia mínima é chamada função trabalho W e varia de metal para metal (ver a tabela a seguir).

metal	W(eV)
césio	2,1
Potássio	2,3
sódio	2,8

- Calcule a energia do fóton (em eV), quando o comprimento de onda da luz incidente for de 500 nm.
- A luz de 500 nm é capaz de arrancar fotoelétrons de quais dos metais apresentados na tabela?
- Qual será a energia cinética dos fotoelétrons emitido pelo potássio, se o comprimento de onda da luz incidente for 300 nm.

05. (UFMG – 1995) A natureza da luz é uma questão que preocupa os físicos há muito tempo. No decorrer da história da física, houve predomínio ora da teoria corpuscular – a luz seria constituída de partículas – ora da teoria ondulatória - a luz seria uma onda.

- Descreva, a concepção atual sobre a natureza da luz.
- Descreva, resumidamente, uma observação experimental que sirva de evidência para a concepção descrita no item anterior.

06. A função trabalho de um dado metal é de 2,5 eV.

- Verifique se ocorre a emissão fotoelétrica quando sobre esse metal incide luz de comprimento de onda 600 nm. A constante de Planck é $h = 4,2.10^{-15} eV.s$ e a velocidade da luz é 300 000 km/s.
- Qual é a frequência mais baixa de luz incidente capaz de arrancar fotoelétrons do metal?

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo primeiramente, apresentamos reflexões sobre aos resultados provenientes do trabalho com o grupo piloto e consequentes alterações na unidade de ensino e instrumentos de coleta de dados. Em seguida, analisaremos as respostas dos sujeitos da pesquisa na avaliação de diagnóstico inicial e na avaliação final de conhecimento usando como referencial Cardoso e Dickman (2011) e uma interpretação do desempenho dos sujeitos nas questões das avaliações, a partir da Taxonomia de Bloom Revisada (2001).

6.1 REFLEXÕES SOBRE O GRUPO PILOTO

Aplicamos nossa primeira unidade de ensino durante o primeiro semestre de 2014 no Curso Técnico Integrado em Informática do Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS, Campus Aquidauana. Esta turma, composta de 15 sujeitos, estava regularmente matriculada na disciplina de Física 6, cuja ementa curricular da disciplina explora tópicos de Física Moderna e Contemporânea.

Consideramos que a aplicação da unidade de ensino PILOTO, no momento previsto pela ementa para intervenção em sala de aula, possibilitaria avaliar com maior profundidade as dificuldades e potencialidades de nossa proposta. Além disso, entendemos que um grupo composto especificamente para participar de um curso extraescolar de Física Quântica, poderia propiciar a outros professores o entendimento de que nossa unidade de ensino não estaria planejada pensando em um contexto real de sala de aula.

Estipulamos os seguintes objetivos para a etapa da pesquisa relacionada ao grupo piloto:

- a) verificar a adequação temporal dos planos de aula, da execução do roteiro de atividades na simulação computacional e da realização das avaliações;
- b) analisar a estrutura e sequência de aulas propostas e
- c) calibrar nossos instrumentos de coleta de dados, em especial, a avaliação final de conhecimento.

Com relação à análise das respostas elaboradas pelos sujeitos na avaliação final de conhecimento, tínhamos como objetivo principal avaliar a confiabilidade das medidas por meio da Análise de Consistência Interna.

6.1.1 Resultados e análise

Concluimos que o tempo estimado para as atividades em cada plano de aula foi considerado satisfatório, bem como o tempo previsto para realização das atividades utilizando a simulação computacional e para realização das avaliações.

Considerando a organização sequencial das aulas, especificamente com relação ao momento da utilização do roteiro de atividades para o uso da simulação computacional, evidenciamos que os sujeitos tiveram dificuldades para entender o Efeito Fotoelétrico como um processo de transferência de energia, em particular, no que diz respeito à relação existente entre energia cinética dos fotoelétrons e a variação do comprimento de onda.

Ao propor esta primeira organização de aulas, acreditávamos que os elementos visuais apresentados pela simulação computacional possibilitariam aos sujeitos relacionar as mudanças ocorridas com a velocidade dos fotoelétrons com as alterações provocadas no comprimento de onda e, assim, eles elaborariam uma descrição para o fenômeno utilizando a Lei de Conservação da Energia. No entanto, a maioria das respostas nestas atividades ficaram em branco.

Isto sinalizou que, embora grande parte dos sujeitos pudessem ter apreendido estes conceitos separadamente, visto que foi feita uma nova abordagem destes conceitos em sala de aula após a avaliação de diagnóstico inicial, a tarefa de reconhecer uma situação de causa-efeito, utilizando-os para explicar sinteticamente o Efeito Fotoelétrico, não ocorreu. Neste caso, mesmo solicitando e induzindo uma interpretação utilizando conceitos de energia, os sujeitos não conseguiram, naquela ação proposta, associar a mudança na energia cinética dos fotoelétrons com as variações no comprimento de onda. Estes resultados nos levaram a conclusão de que tal tarefa era demasiadamente complexa para ser solicitada antes da apresentação do modelo corpuscular de Albert Einstein.

Assim, para uma segunda aplicação da unidade de ensino, em uma nova situação de coleta de dados, que foi realizada no segundo semestre de 2014, decidimos que seria mais interessante dividir em dois momentos a utilização do roteiro de atividades na simulação computacional. O primeiro momento (etapa 4), seria logo após a discussão dos resultados encontrados por Philip Lenard em 1902 (aula 05) e o segundo após a discussão do modelo corpuscular de Albert Einstein (aula 07), ambos ainda com carga horária de 45 minutos.

Julgamos que a utilização da simulação computacional em momentos pós aula expositiva possibilitaria a aplicação dos princípios da Diferenciação Progressiva e Reconciliação Integrativa da Teoria da Aprendizagem Significativa - TAS. A utilização da 1ª

Parte da simulação computacional permitiria que os sujeitos reconhecessem as duas principais observações experimentais que foram relatadas por Philip Lenard no experimento do Efeito Fotoelétrico: a não dependência da intensidade de luz para ocorrência do efeito e a emissão de fotoelétrons somente acima de um valor mínimo de frequência de luz. A utilização da 2ª parte da simulação computacional permitiria aos sujeitos aplicar o modelo corpuscular para luz para explicar novas evidências experimentais.

Essa decisão levou em consideração o entendimento de que a utilização da simulação computacional, após o professor já ter apresentado as novas informações em sala de aula, contribuiria para uma reorganização dos conceitos na estrutura cognitiva dos sujeitos (processo assimilação de novos conceitos), possibilitando que os novos conceitos se relacionassem de maneira não-substantiva e não-arbitrária com os subsunçores existentes.

Com relação ao desempenho dos sujeitos na avaliação de diagnóstico inicial, os resultados indicaram que, de uma maneira geral, os 15 sujeitos participantes do grupo piloto não apresentavam a maioria subsunçores necessários para introdução dos novos conceitos de Física Quântica. Somente em cerca de 40 % das respostas indicavam conceitos prévios bem definidos e estáveis sobre a Estrutura Atômica; 20% a respeito das Ondas Eletromagnéticas e 30% sobre Lei de Conservação da Energia. A exceção foi que cerca de 80% dos sujeitos resolveram corretamente as questões onde era exigida a aplicação de fórmulas, conversão de unidades de medidas e operações de números com potência de dez, sinalizando que estes sujeitos possuíam os subsunçores relacionados à transformação de unidades de medidas e operações básicas, de forma clara e bem definida para estes sujeitos.

Levando-se em consideração a alta probabilidade de os sujeitos da pesquisa apresentassem os mesmos resultados encontrados, visto que estávamos trabalhando com grupos de sujeitos da mesma cidade, que provém do mesmo nicho cultural que frequentaram a mesma escola e que tiveram aulas com os mesmos professores de física nos últimos anos, avaliamos que deveríamos planejar e adicionar uma nova estratégia de ensino. Assim, decidimos que, caso os sujeitos da pesquisa não apresentassem os subsunçores necessários para aprendizagem dos novos conceitos, utilizaríamos as duas aulas subsequentes à aplicação da avaliação de diagnóstico inicial para ensinar/revisar/discutir/consolidar os subsunçores necessários.

Especificamente com relação ao subsunçor Ondas Eletromagnéticas, uma vez que este contém um número maior de propriedades a serem recordadas e, foi o que apresentou o menor índice de presença na estrutura cognitiva dos sujeitos, decidimos que também seria conveniente

propor uma atividade extra aos sujeitos que apresentassem maiores dificuldades na avaliação de diagnóstico inicial: solicitaríamos a eles a apresentação um seminário sobre o conceito subsunção após a aplicação da avaliação de diagnóstico inicial.

Conforme apontamos anteriormente, também tínhamos o objetivo de avaliar a confiabilidade das medidas por meio da Análise de Consistência Interna. O Quadro 8 apresenta de forma resumida os resultados da análise de consistência interna para as respostas dos 11 sujeitos do grupo piloto²², que participaram de todas as atividades.

Como pode ser visto no quadro 8, considerando que para situações de ensino somente correlações acima de 0,70 são aceitáveis, não tivemos sucesso quanto à fidedignidade em nossa primeira avaliação de conhecimento, pois obtivemos um valor de coeficiente alfa de Cronbach igual a 0,48. Isto sugere que as questões selecionadas para compor a avaliação não estavam se referindo ao mesmo conjunto de habilidades cognitivas, isto é, questões de maior dificuldade estavam tendo o mesmo *score* que questões de menor dificuldade. Portanto, a primeira avaliação final de conhecimento, como um todo, não estava avaliando as mesmas características nas demais questões e, assim, esta avaliação precisaria ser descartada ou modificada. Optamos por descartar todas as questões e elaboramos uma nova avaliação, pois o valor de alfa de Cronbach foi considerado muito abaixo do aceitável.

QUADRO 7- Resumo da análise de consistência interna – aplicação da avaliação final de conhecimento ao grupo piloto (Semestre 2014/1, onde N é o número de estudantes)

Avaliação de conhecimento	Número de estudantes	Soma da variância em cada questão	Variância total na avaliação	Coefficiente alfa de Cronbach
Primeira	11	1,48	1,29	0,48
Segunda	11	1,06	4,15	0,79

O Quadro 8 ainda mostra que com a segunda avaliação final de conhecimento, também respondida pelos mesmos sujeitos do grupo piloto, atingimos um índice razoável de confiabilidade em nosso instrumento de medida, pois foi obtido um valor de coeficiente alfa de Cronbach igual a 0,79. Sintetizando, este resultado significa que podemos garantir que nosso

²² O grupo piloto era composto de 15 sujeitos, regularmente matriculados na disciplina de física 6, mas foram analisadas somente as respostas de apenas 11 sujeitos, pois quatro, por algum motivo, faltaram em algumas das aulas ministradas. A exclusão desses sujeitos ocorreu por entendermos que estas faltas trariam prejuízos e dificuldades de aprendizagem dos novos conceitos que não estavam diretamente relacionadas à estrutura de nossa unidade de ensino potencialmente significativa.

instrumento de coleta de dados é fidedigno, ou seja, poderá ser aplicado duas vezes, em momentos distintos, sob as mesmas circunstâncias, fornecendo os mesmos resultados.

Por fim, selecionamos as respostas encontradas na questão 05 da segunda avaliação final de conhecimento para termos uma primeira sondagem dos possíveis indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos estudados e dificuldades que encontraríamos futuramente quando aplicássemos nossa unidade de ensino junto aos sujeitos da pesquisa. A escolha desta questão deve-se ao fato dela exigir o entendimento de quatro novos conceitos estudados: intensidade, frequência de luz, energia cinética dos fotoelétrons e fótons. Além disso, ela foi formulada com base nos resultados de aprendizagem sobre o Efeito Fotoelétrico apresentados no trabalho de Steinberg et al (1996), no qual são identificadas as principais dificuldades de aprendizagem dos conceitos físicos presentes no experimento do Efeito Fotoelétrico..

Para responder corretamente a essa questão, os sujeitos deveriam compreender claramente a relação entre corrente elétrica e intensidade de luz, bem como ter em sua estrutura cognitiva a distinção clara entre os conceitos de intensidade e frequência de luz e, por fim, entender a relação entre energia cinética dos fotoelétrons e o comprimento de onda da luz incidente. Apresentamos a questão 05 logo abaixo.

Questão 05. Justifique as afirmativas falsas:

1. No efeito fotoelétrico podemos utilizar a 1ª Lei de Ohm da eletricidade ($U = R.i$), pois a corrente de fotoelétrons é diretamente proporcional à tensão da bateria.
2. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a energia transportada por um fóton.
3. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a quantidade de fótons que há no feixe de luz.
4. O fóton é uma partícula carregada eletricamente.
5. A energia cinética de um fotoelétron pode ser aumentada se aumentarmos também o valor do comprimento de onda.

Uma vez que nesta questão o sujeito necessitava justificar por que todas afirmativas eram erradas e, levando-se em conta os apontamentos de Steinberg et al (1996), julgamos que as respostas dos sujeitos à questão forneceriam importantes indícios para inferirmos se sujeitos apresentaram dificuldades em construir conexões entre o novo conhecimento adquirido e seus subsunçores, isto é, se eles conseguiram integrar os novos conceitos em suas estruturas cognitivas.

A análise das respostas dos sujeitos mostrou que a maioria dos sujeitos apresentava um baixo entendimento destes novos conceitos. Observamos que nenhum sujeito reconheceu as afirmativas 1 e 4 como falsas, somente três justificaram corretamente as afirmativas 2 e 3 como

errôneas e apenas cinco sujeitos explicaram corretamente porque a afirmativa 5 estava incorreta.

Quanto as afirmativas 2 e 3, consideramos que estariam corretas as respostas que apontassem as diferenças entre frequência de luz e intensidade de luz, isto é, aquelas em os sujeitos definissem frequência de luz como grandeza física relacionada à energia transportada pelos fótons e intensidade de luz como grandeza que representa o número de fótons que existe num feixe de luz. Como exemplo de resposta esperada, podemos apontar a seguinte justificativa de um sujeito SGP01²³: “2. *Falsa, pois somente a intensidade de luz diz o número de fótons da luz.* 3. *Falsa, pois a frequência influencia na energia dos quanta de luz*”.

Já para a afirmativa 5, consideramos que estariam corretas as respostas que indicassem que é possível aumentar a energia cinética dos fotoelétrons pela redução do comprimento de onda do feixe de luz incidente. Como exemplo de resposta esperada, podemos indicar a seguinte justificativa encontrada do sujeito SGP02: “5. *É possível aumentar a energia cinética dos fotoelétrons aumentando a frequência, portanto, podemos mexer na energia mudando o comprimento de onda também*”. Esta resposta sinaliza indícios de aprendizagem significativa, pois mostra que o sujeito compreendeu que a ocorrência do Efeito Fotoelétrico está condicionada a energia do fóton ser maior que um valor mínimo e que somente a frequência de luz (ou o comprimento de onda) tem influência na energia cinética dos fotoelétrons.

Estes resultados contribuíram para elucidar que a aprendizagem significativa dos novos conceitos relacionados ao Efeito Fotoelétrico não seria algo trivial, como já apontado por Steinberg et al (1996) e Cardoso e Dickman (2011).

6.2 A UNIDADE DE ENSINO

Nossa unidade de ensino, cujos resultados de aprendizagem apresentamos nesse tópico, foi planejada para ser executada no segundo semestre de 2014, com 16 sujeitos, regularmente matriculados na disciplina de Física 6 do Curso Técnico Integrado de Edificações do IFMS. Era composta de 12 aulas de 45 minutos cada, utilizando diferentes ferramentas e estratégias metodológicas, objetivando contribuir para que os sujeitos participassem da aplicação como agentes ativos no processo de ensino.

²³ SGP: Sigla utilizada para identificar e diferenciar os sujeitos do grupo piloto.

Exploramos os conceitos a partir de leitura de textos, atividades experimentais demonstrativas, seminários, vídeos, animação e simulação computacional, aspectos de História e Filosofia da Ciência, resolução de exercícios e mapa conceitual. A diversidade de nossas escolhas almejava estimular a pré-disposição dos sujeitos para aprender, pontuada por Ausubel (2003) como uma das condições essenciais para que a aprendizagem significativa de novos conceitos ocorra.

O Quadro 9 mostra o cronograma das atividades desenvolvidas com os sujeitos da pesquisa no segundo semestre de 2014.

QUADRO 8 - Cronograma de execução das atividades previstas na unidade de ensino

CRONOGRAMA DE ATIVIDADES			
Aula	Data	Atividade/Local	Duração
01	23/10	Avaliação de diagnóstico inicial/sala de aula	45 min
02 e 03	04/11	Estratégia de Ensino/sala de aula	90 min
04	06/11	Aula expositiva e dialogada/sala de aula	45 min
05 e 06	11/11	Aula expositiva e dialogada + utilização da simulação computacional/sala de informática	90 min
07	13/11	Aula expositiva e dialogada/sala de aula	45 min
08 e 09	18/11	Utilização da simulação computacional + resolução de exercícios/sala de informática	90 min
10	20/11	Resolução de exercício, mapa conceitual, Experimento de Robert Millikan (1916) e a rejeição da comunidade científica das ideias de Einstein/sala de aula.	45 min
11	25/11	Efeito Compton, a aceitação da comunidade científica das ideias de Einstein e Princípio da Complementariedade de Bohr/sala de aula.	45 min
12	25/11	Verificação de aprendizagem/sala de aula	45 min

Optamos por excluir da análise dos dados os sujeitos que tiveram mais de quatro faltas (25% da carga horária) durante toda aplicação da unidade ensino, pois isto poderia resultar em prejuízos no processo de aprendizagem ao sujeito, o que de certa forma influenciaria nos resultados da avaliação de nossa metodologia de ensino. Partindo desse entendimento, nossa análise se concentrou nas respostas de 13 sujeitos, sendo excluídos da análise os três sujeitos com quatro ou mais faltas. Os sujeitos participantes do grupo de pesquisa foram identificados pela letra A seguida de um número aleatoriamente atribuído: A1, A2,...,A16.

6.2.1 Análise da avaliação de diagnóstica inicial - ADI

Para a análise dos dados coletados na avaliação de diagnóstica inicial fizemos uso da classificação de grupos de respostas proposta por Cardoso e Dickman (2011), com base no

referencial da Teoria da Aprendizagem Significativa TAS: Subsuñor Presente (SP); Subsuñor Mal Definido (SMD) ou Subsuñor Ausente (SA).

Enquadramos nesses grupos respostas que apresentam indícios de subsuñores bem ou mal definidos, considerando conceitos relacionados: (a) ao modelo atômico de Bohr-Rutherford (questões de 01 a 04); (b) às ondas eletromagnéticas (questões de 05 a 09); (c) operações matemáticas e sistema internacional de unidades de unidades (questões 10, 11, 12 e 15) e (d) à Conservação da Energia (questões 13 e 14).

Antes de iniciarmos nossa análise, devemos esclarecer que somente as respostas de dez sujeitos puderam ser analisadas, pois os sujeitos A11, A15 e A16 foram excluídos pelo critério de faltas excessivas e A2, A3 e A5 faltaram no dia de aplicação da avaliação de diagnóstico inicial, entretanto, estes últimos não apresentaram ao final da aplicação da unidade de ensino um número de faltas superior a 25%.

Iniciamos nossa análise pela questão 01, a qual consistia de um teste de verdadeiro ou falso contendo dez afirmativas, identificadas de (a) a (j), relacionadas à estrutura da formação da matéria (átomos, fotoelétrons, prótons e nêutrons), das quais somente (e) e (f) eram falsas. A classificação nas categorias foi definida de acordo com a quantidade de afirmativas identificadas corretamente como verdadeira ou falsa, sendo um número mínimo de oito para SP e cinco para SMD.

A questão 01 e a classificação das respostas de cada sujeito pode ser visualizada no Quadro 10.

QUADRO 9 - Questão 01 e 02 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 01		Com relação à estrutura do átomo, assinale verdadeiro (V) ou falso (F): k. () No átomo há espaços vazios. l. () O átomo é constituído de núcleo e eletrosfera. m. () Os fotoelétrons se situam no eletrosfera. n. () No núcleo encontram-se prótons e nêutrons. o. () A massa do elétron é aproximadamente igual à massa do próton p. () A carga negativa do átomo está confinada no seu núcleo. q. () O núcleo contém quase a totalidade da massa do átomo. r. () Os fotoelétrons movimentam-se ao redor do núcleo em órbitas definidas. s. () Átomos neutros no estado fundamental apresentam igual número de prótons e fotoelétrons. t. () Os fotoelétrons podem ser “arrancados” de um átomo.									
Questão 02		Justifique o(s) item(s) falso(s) da questão anterior.									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q01	SP	SP	SMD	SMD	SMD	SP	SMD	SP	SP	SMD
	Q02	SA	SP	SA	SA	SA	SMD	SA	SA	SA	SA

Evidenciamos no quadro acima, para a questão Q01 que cinco respostas (50%) foram classificadas como subsunçor mal definido (SMD) e outras cinco (50%) como subsunçor presente (SP). Como exemplo de resposta classificada como SMD temos o texto elaborado pelo sujeito A10, que identificou seis das oito respostas verdadeiras, no entanto, as outras duas afirmativas verdadeiras ele as considerou como falsas e as que realmente eram falsas ele as considerou como verdadeiras. Ao justificar a alternativa (h) A10 afirma que ela é “[...] *Falsa, porque os fotoelétrons movimentam-se ao redor do núcleo em órbitas indefinidas*”. Sua resposta sugere desconhecimento de que os fotoelétrons orbitam em torno do núcleo em órbitas definidas pelas camadas de K a Q. Assim, entendemos que ele não recorda importantes propriedades da estrutura atômica e por isso foi classificada como SMD.

No entanto, o desempenho dos sujeitos em Q01 não se repetiu Q02, onde era solicitado que eles justificassem as afirmativas consideradas falsas na questão 01, como é possível também visualizar no Quadro 10. De acordo com as respostas analisadas, observamos que oito deles (80%) não conseguiram elaborar uma explicação considerada como cientificamente correta, sendo que, a maioria deles deixou a questão em branco.

Somente a resposta de A4 foi classificada na categoria SP. Ele identificou corretamente as afirmativas (e) e (f) como falsas e ao elaborar a justificativa afirmou: “*e). Falsa, pois o próton é mais pesado que o elétron; f). Falsa, pois a carga negativa está localizada no elétron que está na eletrosfera*”. Evidenciamos no texto o emprego de termos entendidos como cientificamente aceitos, o que entendemos que sinaliza indícios de um entendimento conceitual e sugere que o mesmo aprendeu significativamente os conceitos relacionados à estrutura atômica.

A resposta de A9 na questão 02 foi considerada SMD porque ele identificou somente alternativas (e) como falsa. Em sua justificativa ele afirmou que: “*A massa do próton é muito maior que a massa do elétron*”. Como ele não reconheceu a afirmativa (f) como falsa na questão 01, ele não elaborou nenhuma justificativa na questão 02. Assim, quando o analisamos conjuntamente as respostas deste sujeito para ambas as questões, percebemos que ele possui um conhecimento parcial sobre o subsunçor Estrutura Atômica.

Na questão 03 buscamos identificar se os sujeitos associavam a condutividade elétrica de um metal ao conceito de elétron livre e na 04, solicitamos aos sujeitos que explicassem por que diferentes metais têm diferentes condutibilidades elétricas, pois desejávamos saber se os

sujeitos compreendiam que os fotoelétrons na verdade não estão totalmente livres, mas presos por diferentes ligações metálicas.

O Quadro 11 mostra estas questões e as respectivas classificações das respostas dos sujeitos para cada questão.

QUADRO 10 - Questões 03 e 04 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 03		Explique por que os metais, em geral, são bons condutores elétricos?									
Questão 04		Por que um fio de prata é melhor condutor elétrico do que um fio de cobre?									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q03	AS	SP	AS	SA	SMD	SP	SP	SA	SP	SMD
	Q04	AS	SP	AS	SA	SMD	SP	SP	SA	AS	SA

Podemos observar no quadro acima que em Q03 quatro respostas (40%) foram classificadas como subsunçor presente (SP), duas (20%) como subsunçor mal definido (SMD) e as outras quatro respostas (40%) foram classificadas como subsunçor ausente (SA). Em Q04, três respostas (30%) foram classificadas como subsunçor presente (SP), uma (10%) como subsunçor mal definido (SMD) e as outras seis respostas (60%) foram classificadas como subsunçor ausente (SA).

Primeiramente, é importante salientar que, nessas questões, todas as respostas classificadas na categoria SA indicam ausência de resposta, pois os sujeitos deixaram a mesma branca. Em segundo lugar, foram classificadas na categoria SP respostas como a do sujeito A10, que afirma na questão Q03: *“Porque há um mar de fotoelétrons livres na composição destes metais, assim a eletricidade é conduzida mais rapidamente”* e ao explicar a diferença entre a condutividade da prata e do cobre, em Q04 pontua que era *“porque a prata tem mais fotoelétrons livres que o cobre tem em sua composição”*. Em nossa análise, consideramos que o texto elaborado pelo sujeito apresenta indícios de entendimento conceitual, ao explicar a condutibilidade elétrica de um material utilizando a ideia de *“mar de fotoelétrons livres”* e pontuar a quantidade desses fotoelétrons na prata e no cobre, como resultado na diferença de condutibilidade.

Ao analisar a resposta elaborada por A8 encontramos indícios que sugerem que ele optou por explicar a condução elétrica por meio do conceito de resistência elétrica ao responder Q03 afirmando que era *“Porque eles são menos resistentes”* e explicando a diferença entre a prata e o cobre, em Q04, afirmando que era *“Porque o cobre é mais resistente que a prata”*. Esse entendimento nos levou a classificar suas respostas como SMD, pois apesar de ser uma resposta cientificamente aceita, ela não explica a essência da condução elétrica com base na

estrutura atômica. Desta forma, inferimos que há uma sinalização de indícios de um entendimento conceitual, porém este não foi totalmente explicitado.

Em terceiro lugar, comparando a classificação das respostas dos sujeitos em ambas as questões, notamos que somente há divergência nas respostas dos sujeitos A13 e A14. A classificação das respostas destes sujeitos como SP e SMD na questão Q03, respectivamente, indica que eles fazem uso o conceito de elétron livre para explicar a condutibilidade elétrica em metais, porém, ao deixar a questão Q04 sem resposta (SA), sinalizam que não compreendem que o elétron na verdade não está totalmente livre metal nem compreendem a essência da condução elétrica com base na estrutura atômica.

Por fim, ainda observando a categorização das respostas dos sujeitos em ambas as questões, notamos um percentual elevado de respostas foram classificadas como subsunçor ausente (SA), 40% em Q03 e 60% em Q04, indicando que muitos sujeitos não recordaram o modelo de condução de calor e eletricidade em metais.

Nessas primeiras quatro questões, buscamos identificar indícios de clareza e estabilidade dos subsunçores relacionados à estrutura da matéria, pois entendemos, com base no referencial TAS, que os mesmos seriam utilizados como ancoradouros para aprendizagem de novos conceitos, principalmente o conceito de função trabalho. Nossos resultados sinalizam que tais subsunçores não estavam claramente estáveis na estrutura cognitiva na maioria dos sujeitos da pesquisa.

Tendo em vista que a estabilidade, clareza, refinamento e diferenciação dos conceitos relacionados ao modelo atômico de Bohr-Rutherford são fundamentais para o entendimento do conceito de função trabalho na equação de Einstein, sendo esta por sua vez apontada na literatura com uma dificuldade específica de aprendizagem no experimento do Efeito Fotoelétrico (Klassen, 2009), concluímos que seria necessário corrigir essas quatro questões juntamente com os sujeitos do grupo de pesquisa na aula subsequente.

Nas questões de Q05 a Q10 exploramos propriedades e características associadas ao subsunçor Ondas Eletromagnéticas. A primeira foi subdividida em dois itens: na alternativa 5a, investigamos se os sujeitos relacionavam o movimento ondulatório (som ou luz) com o processo de transporte de energia e na 5b, se eles entendiam o tipo de relação matemática entre frequência e comprimento de onda. O Quadro 12 mostra esta questão e classificação das respostas dos sujeitos.

QUADRO 11 - Questões 05a e 05b da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 05		Com relação ao estudo de ondulatória, responda: a) Qual a propriedade fundamental das ondas, tanto mecânica como eletromagnéticas? b) A equação fundamental das ondas é $v = \lambda.f$. Assim, podemos afirmar que o comprimento de onda e a frequência da onda são grandezas proporcionais?									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q05a	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA
	Q05b	SP	SA	SA	SP	SA	SP	SP	SA	SA	SP

De acordo com as respostas analisadas, observamos que todos os sujeitos deixaram 5a em branco, o que nos levou a classifica-las como subsunçor ausente (SA). O quadro 12 indica que cinco sujeitos (50%) tiveram sua resposta para a 5b classificadas como subsunçor presente (SP), isso porque consideraram que o comprimento de onda é inversamente proporcional ao valor da frequência da onda eletromagnética. Os outros cinco sujeitos (50%) afirmaram que relação entre as duas grandezas era do tipo diretamente proporcional, resposta considerada cientificamente incorreta e por isso classificada como subsunçor ausente (SA).

Este resultado indica que, embora alguns sujeitos recordem o comportamento inverso entre comprimento de onda e frequência, nenhum deles foi capaz de reconhecer o transporte de energia como principal propriedade de um fenômeno ondulatório.

Nas questões Q06 a Q08, solicitamos aos sujeitos que definissem o conceito de onda eletromagnética, citassem e listassem os sete tipos faixas de frequências em ordem crescente de frequência. O Quadro 13 mostra as respectivas questões e as classificações das respostas dos sujeitos.

QUADRO 12 - Questões 06 a 08 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 06		O que é uma onda (ou radiação) eletromagnética?									
Questão 07		O espectro eletromagnético é dividido geralmente em sete faixas de frequências de ondas (ou radiações) eletromagnéticas. Quais são elas?									
Questão 08		Escreva em ordem crescente de frequência as sete faixas de frequências das radiações eletromagnéticas anteriormente citadas.									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q06	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SMD
	Q07	SMD	SA	SMD	SA	SA	SMD	SMD	SA	SA	SMD
	Q08	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SA	SMD

Observa-se que, nas questões Q06 e Q08, nove respostas (90%) foram classificadas como subsunçor ausente (SA), neste caso os sujeitos novamente deixaram a questão em branco. Somente a resposta de A14 (10%) foi classificada como subsunçor mal definido (SMD), pois ele definiu as ondas eletromagnéticas como sendo “ondas que podem se propagar no vácuo”;

e deu como exemplos “*ondas de rádio, luz, raios X*”. Neste caso, percebemos que ele indicou uma importante característica das ondas eletromagnéticas, geralmente enfatizada para diferenciá-las das ondas mecânicas, no entanto, a resposta esperada seria aquela que afirmasse que tais ondas são oscilações de campos elétricos e magnéticos, que, autossustentando-se, encontram-se desacoplados das cargas elétricas que lhe deram origem. Assim, a resposta do sujeito A14 sugere um entendimento conceitual parcial desse subsunçor.

A classificação das respostas encontradas em Q07 apresentou um número maior de subsunçores mal definidos em relação às outras duas. Nela, solicitamos que os sujeitos citassem, sem nenhum tipo de ordem específica, os sete tipos de ondas que dividem o espectro eletromagnético, a saber: ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama.

A análise nos levou a classificar cinco respostas (50%) como subsunçor mal definido (SMD), partindo do entendimento de que os sujeitos não conseguiram recordar todas as faixas do espectro eletromagnético, mas somente algumas. As outras cinco (50%) foram classificadas como subsunçor ausente (SA), pois os sujeitos deixaram a questão em branco.

Vale salientar que nenhum dos sujeitos recordou mais que quatro tipos de ondas e as respostas SMD assemelham-se a elaborada por A6 que citou as seguintes ondas: “*Raios X, infravermelho, ultravioleta e rádio*”.

A partir da questão Q09, indicada no Quadro 14 com os respectivos resultados da classificação nas categorias de análise, observamos que o desempenho dos sujeitos melhora significativamente. Nesta questão os sujeitos deveriam identificar, dentre as seis cores que compõe a luz branca, quais apresentam maior e menor comprimento de onda. Esperava-se que os sujeitos recordassem que a luz vermelha tem o maior comprimento de onda enquanto que a luz violeta tem o menor.

QUADRO 13 - Questão 09 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 09	A luz branca pode ser dividida em seis cores diferentes. Em ordem alfabética, elas são: alaranjada, amarela, azul, verde, vermelha, violeta. a) Qual a cor de luz que tem o maior comprimento de onda? b) Qual a cor de luz que tem o menor comprimento de onda?									
Sujeitos	A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	SA	SP	SP	SA	SP	SA	SP	SP	SP	SMD

As respostas elaboradas pelos sujeitos possibilitaram a classificação indicada no Quadro 14: seis respostas (60%) foram classificadas como subsunçor presente (SP), uma (10%) como subsunçor mal definido (SMD) e outras três (30%) como subsunçor ausente (SA).

Classificamos com SMD a resposta de A14 que apontou como maior comprimento de onda a cor “*vermelha*” e como menor “*amarela*”, ou seja, respondeu corretamente apenas a alternativa (a), o que sinaliza um entendimento parcial deste subsunçor ou uma escolha aleatória correta e outra errada.

No caso das três respostas classificadas como SA os sujeitos não responderam corretamente nenhuma das alternativas, aparentemente escolheram aleatoriamente uma das cores apenas para não deixar a questão em branco, como podemos observar com A6: “*a) verde; b) vermelha*”. Esse resultado sugere que o sujeito não apresenta este subsunçor de forma clara e estável em sua estrutura cognitiva.

Em síntese, com relação à classificação das respostas dos sujeitos para as questões que envolviam o subsunçor Ondas Eletromagnéticas, evidenciamos que a maioria dos sujeitos apresentaram poucos indícios de aprendizagem significativa. Este resultado é importante, pois este subsunçor serviria de ancoragem para os conceitos de energia de um fóton, frequência de corte, intensidade de luz e função trabalho.

Diante desses indícios, concluímos que também seria necessário discutir com o grupo estas seis questões em sala em aula, em momento posterior a sua execução, efetuando a correção da avaliação. Outra ação que julgamos necessária, devido ao elevado número de características e propriedades deste subsunçor, foi a elaboração um seminário de 20 minutos sobre o tema, solicitado a dois sujeitos para apresentação na aula seguinte, buscando estimular um engajamento dos sujeitos com relação ao novo conteúdo que seria abordado.

Para responder corretamente as questões Q10, Q11, Q12 e Q15, o sujeito deveria apresentar subsunçores relacionados a conhecimentos básicos sobre o sistema internacional de unidades de medidas, interpretação de informações por meio de gráficos e operações matemáticas.

Na questão 10, indicada no Quadro 15 juntamente com a respectiva classificação, foi solicitado aos sujeitos que resolvessem um exercício aplicando a equação fundamental de onda, fazendo uso de números com potência de dez e transformações de unidades de medidas.

QUADRO 14- Questão 10 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 10	As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade de $3,0 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 90,5 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, em metros . Dados: MHz = megahertz = 10^6 Hz e $v = \lambda \cdot f$									
Sujeitos	A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	SP	SP	SP	SA	SP	SA	SA	SA	SMD	SA

De acordo com as respostas analisadas, classificamos quatro respostas (40%) como subsunçor presente (SP), uma (10%) como subsunçor mal definido (SMD) e cinco (50%) como subsunçor ausente (SA).

Foram classificadas na SP as respostas nas quais os sujeitos utilizaram corretamente a equação fundamental de onda ($v = \lambda \cdot f$), bem como realizaram operações com potência de dez e transformações de unidades de medida adequadas. A figura 17 ilustra a resposta de A1 para esta questão. Nela podemos observar que o sujeito transforma corretamente as unidades de medidas de velocidade e frequência de onda e em seguida utiliza estes valores para calcular o comprimento de onda. Tais observações sugerem que há indícios de aprendizagem significativa para este subsunçor e por isso classificamos a resposta deste sujeito como SP.

Figura 167 -Resolução de A1 para o exercício proposto na questão 10, classificada como SP

Questão 10) As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade $3,0 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 90,5 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, **em metros**.

Dados: MHz = megahertz = 10^6 Hz e $v = \lambda \cdot f$

$v = 3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$
 $f = 90,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$
 $v = \lambda \cdot f$
 $3 \cdot 10^5 = \lambda \cdot 90,5 \cdot 10^6$
 $\lambda = \frac{3 \cdot 10^5}{90,5 \cdot 10^6}$
 $\lambda = 3,31 \cdot 10^{-2}$
 $\lambda = 0,0331 \cdot 10^{-2}$

Na figura 18 apresentamos a resolução de A13 classificada na categoria SMD, pois inicialmente ele transforma corretamente as unidades de medida, no entanto, na parte final da resolução do exercício, ele confunde os números no momento da divisão e também comete erros na operação com potência de dez. Assim, entendemos que este sujeito é capaz de efetuar transformações de unidade adequadamente, porém, não podemos afirmar que ele apenas cometeu um engano por falta de atenção ou se apresenta dificuldades com operações básicas de matemática. Estes indícios nos levaram a inferir que este subsunçor não está totalmente claro e estável para este sujeito.

Figura 178 - Resolução de A13 para o exercício proposto na questão 10, classificada como SMD

Questão 10) As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade $3,0 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 90,5 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, em metros.

Dados: MHz = megahertz = 10^6 Hz e $v = \lambda \cdot f$

$$v = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = 90,5 \text{ MHz} \rightarrow 90,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$v = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^8 = 90,5 \cdot 10^6 \cdot \lambda$$

$$\lambda = \frac{30,5 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8}$$

$$\lambda \approx 30 \cdot 10^{-2}$$

$$\lambda \approx 300 \text{ m}$$

Para o grupo de respostas classificadas como subsunçor ausente (SA), identificamos que duas foram assim classificadas devido a erros em operações matemática e/ou unidades de medidas e as outras quatro respostas foram deixadas em branco. A figura 19 ilustra a resposta do sujeito A7. Neste caso, percebemos que ele utiliza os valores fornecidos pelo exercício, sem fazer nenhuma conversão de unidades de medidas, na equação fundamental da onda. Além disso, sua resposta sugere que ele não domina as operações básicas de matemática, pois ele inverte dividendo e divisor na operação, no momento de isolar o comprimento de onda.

Figura 19 - Resolução de A7 para o exercício proposto na questão 10, classificada como SA

Questão 10) As antenas das emissoras de rádio emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na atmosfera com a velocidade $3,0 \cdot 10^5 \text{ km/s}$ e com frequências que variam de uma estação para a outra. A rádio Tupi-Guarani, de Aquidauana-MS, emite uma onda de frequência 90,5 MHz. Calcule o valor do comprimento de onda, em metros.

Dados: MHz = megahertz = 10^6 Hz e $v = \lambda \cdot f$

$$v = \lambda \cdot f$$

$$3 \cdot 10^5 = \lambda \cdot 90,5$$

$$\lambda = \frac{90,5}{3 \cdot 10^5}$$

$$\Rightarrow \lambda = 3 \text{ MHz}$$

Na questão 11, mostrada no Quadro 16, solicitamos aos sujeitos que identificassem quais as unidades de medidas das principais grandezas físicas utilizadas no estudo da ondulatória, enquanto que na questão 12 eles deveriam transformar as unidades de milímetro e micrômetro em metros. Consideramos que os conhecimentos sobre unidades de medidas são fundamentais para que o sujeito tenha êxito na tarefa de aplicar as equações do Efeito Fotoelétrico na resolução de exercícios.

QUADRO 15 - Questões 11 e 12 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 11		Para cada uma das grandezas abaixo, escreve sua respectiva unidade de medida no sistema internacional : f) Velocidade → _____ g) Período → _____ h) Frequência → _____ i) Comprimento de onda → _____ j) Energia → _____									
Questão 12		Converta as seguintes unidades de medidas. Utilize obrigatoriamente notação científica. a) 5,0 mm: _____ m b) 0,022 μm : _____ m									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q11	SP	SMD	SA	SMD	SMD	SMD	SMD	SMD	SP	SMD
	Q12	SP	SMD	SA	SA	SMD	SA	SMD	SMD	SP	SMD

Após a análise das respostas elaboradas pelos sujeitos para a questão 11, decidimos classificar como subsunçor presente (SP) respostas que identificassem corretamente todas as unidades de medidas. Isso resultou em dois resultados (20%) classificados como subsunçor presente (SP). Outros sete (70%) foram enquadrados na categoria subsunçor mal definido (SMD), neste caso encontram-se as respostas que identificassem corretamente pelo menos três unidades de medidas e, por fim, uma resposta (10%) foi classificada como subsunçor ausente (SA), pois o sujeito A6 conseguiu identificar corretamente apenas duas unidades de medidas.

Para a questão 12, o Quadro 16 indica que também somente duas respostas (20%) foram classificadas como subsunçor presente (SP), neste caso encontram os casos em que os sujeitos, em ambos itens, identificam corretamente o valor do prefixo utilizado na unidade de medida apresentada e escrevem este novo valor em notação científica. Outras cinco respostas (50%) foram enquadradas na categoria subsunçor mal definido (SMD), neste caso somente uma das transformações de unidade de medida foi feita corretamente e, por fim, outras três respostas (30%) foram classificadas como subsunçor ausente (SA), neste caso encontram-se duas situações em que o sujeito errou ambas as transformações e outra situação em que a questão foi deixada em branco.

Na última questão da avaliação de diagnóstico inicial, questão Q15, indicada no Quadro 17, os sujeitos deveriam ser capazes de interpretar e compreender novas informações a partir de um gráfico, bem como aplicar novas informações na resolução de um exercício que envolvia a equação de Planck para quantização da energia. Na resolução desse exercício as ferramentas necessárias para resolver a Q10, Q11 e Q12.

De acordo com as respostas encontradas na letra (a), observamos que nenhum sujeito conseguiu interpretar corretamente as informações contidas na tabela e no gráfico apresentados, isto é, ninguém percebeu por meio do gráfico que a luz verde é minimamente absorvida pelas plantas, tendo assim, baixa influência no crescimento das mesmas. Este resultado sugere que todos os sujeitos da pesquisa apresentam dificuldades para interpretar e associar múltiplas informações quando apresentadas por meios diferentes, neste caso tabela e gráfico, e que exigem construir conexões com outros conhecimentos prévios, neste caso fotossíntese, espectro da luz visível, valores de comprimento de onda. Em outras palavras, os sujeitos da pesquisa apresentaram grandes dificuldades na tarefa de sintetizar informações.

Por outro lado, na letra (b), identificamos que oito respostas (80%) estavam corretas, isto é, respostas nas quais os sujeitos utilizaram corretamente as equações apresentadas, bem como realizaram operações com potência de dez e transformações de unidades de medida adequadas. As outras duas respostas (20%) classificadas como subsunçor ausente foram situações que a questão ficou em branco.

QUADRO 16 - Questão 15 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 15	<p>A tabela traz os comprimentos de onda no espectro de radiação eletromagnética, na faixa da luz visível, associados ao espectro de cores mais frequentemente percebidas pelos olhos humanos. O gráfico representa a intensidade de absorção de luz pelas clorofilas a e b, os tipos mais frequentes nos vegetais terrestres.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Espectro de absorção para clorofilas a e b</p> </div> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Comprimento de onda (nm)</th> <th>Cor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>380 – 450</td> <td>Violeta</td> </tr> <tr> <td>450 – 490</td> <td>Azul</td> </tr> <tr> <td>490 – 520</td> <td>Ciano</td> </tr> <tr> <td>520 – 570</td> <td>Verde</td> </tr> <tr> <td>570 – 590</td> <td>Amarelo</td> </tr> <tr> <td>590 – 620</td> <td>Alaranjado</td> </tr> <tr> <td>620 – 740</td> <td>Vermelho</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; font-size: small;">Baseado em: Tratado de Botânica de Strasburger, 36ª ed., Artmed, 2012.</p> <p>Sendo $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$, note e adote:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Módulo da velocidade da luz no vácuo igual $3 \cdot 10^8\text{ m/s}$; 2) Energia do fóton: $E = h \cdot f$ $h = \text{Constante de Planck} = 6,6 \cdot 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$ $f = \text{frequência da radiação eletromagnética}$ 3) O crescimento da planta é mais acentuado quando há mais absorção da energia radiante que vai intensificar a fotossíntese; 4) $v = \lambda \cdot f$ <p>Responda às questões abaixo, com base nas informações fornecidas na tabela e no gráfico.</p>	Comprimento de onda (nm)	Cor	380 – 450	Violeta	450 – 490	Azul	490 – 520	Ciano	520 – 570	Verde	570 – 590	Amarelo	590 – 620	Alaranjado	620 – 740	Vermelho
Comprimento de onda (nm)	Cor																
380 – 450	Violeta																
450 – 490	Azul																
490 – 520	Ciano																
520 – 570	Verde																
570 – 590	Amarelo																
590 – 620	Alaranjado																
620 – 740	Vermelho																

		<p>a) Em um experimento, dois vasos com plantas de crescimento rápido e da mesma espécie foram submetidos às seguintes condições:</p> <p style="text-align: center;">Vaso 1: exposição à luz solar Vaso 2: exposição à luz verde.</p> <p>A temperatura e a disponibilidade hídrica foram as mesmas para os dois vasos. Depois de algumas semanas, verificou-se que o crescimento das plantas diferiu entre os vasos. Em qual dos vasos o crescimento da planta foi maior? Justifique sua resposta.</p> <p>b) Qual a energia E do fóton de luz vermelha cujo comprimento de onda é 660 nm.</p>									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	15.a)	SA	SA	SA	SA	AS	SA	SA	SA	SA	SA
	15.b)	SP	SP	SP	SP	SP	SA	SA	SP	SP	SP

Julgamos que também seria importante fazer a correção destas questões na aula posterior, pois na análise das respostas para estas quatro questões sempre tivemos um percentual de respostas classificadas como subsunçor ausente (SA), indicando que alguns sujeitos não já apresentavam estes subsunçores como bem definidos, claros e estáveis.

Nas questões 13 e 14, indicadas no Quadro 18, investigamos se os sujeitos conseguiam aplicar a Lei de Conservação da Energia na descrição de uma colisão entre esferas.

QUADRO 17 - Questões 13 e 14 da ADI e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 13		<p>“Em um jogo de sinuca, o objetivo é colocar dentro da caçapa todas as bolas ímpares ou pares, para isso, todos os jogadores fazem uso de uma bola branca. Este jogo é muito praticado no Brasil e requer noções de física, mesmo que o jogador, enquanto jogue, não pense assim”.</p> <p>Considere uma sinuca que não ofereça atrito para as bolas e que um jogador decida acertar a bola branca em outra que está parada, com o intuito de colocá-la na caçapa. O jogador, com certa habilidade, dá uma tacada forte e, em seguida, a bola branca colide com a outra em “cheio”. Depois da colisão, a bola branca fica parada e a outra bola adquire certa velocidade, porém um pouco menor que a da bola branca antes da colisão. Utilizando a Lei de Conservação da Energia, explique esta situação.</p>									
Questão 14		<p>O Pêndulo de Newton é um dispositivo muito utilizado para estudar as colisões entre objetos de mesma massa. Conforme pode ser visto na figura, ele é construído a partir de uma série de esferas metálicas (normalmente 5) adjacentes umas das outras. Suponha então que você desloque a primeira esfera até a altura 10 cm e a libere a partir do repouso. Então, você observa que a última esfera se eleva até a altura máxima de 9,5 cm. Utilizando a Lei de Conservação da Energia, explique esta situação.</p>									
Sujeitos		A1	A4	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	Q13	SMD	SP	SMD	SA	SP	SP	SMD	SP	SA	SA
	Q14	SA	SP	SA	SMD	SP	SP	SMD	SA	SA	SA

A análise das respostas possibilitou classificar quatro (40%) dessas como subsunçor presente SP, três (30%) como subsunçor mal definido (SMD) e outras três (30%) como subsunçor ausente (SA), sendo situações em que as respostas estavam em branco.

Explicações como a elaborada pelo sujeito A12 foram classificadas na categoria SP: “A energia da bola branca ao colidir com a outra bola se transfere quase totalmente fazendo com que a bola branca perca velocidade e a outra ganhe velocidade”. Percebemos que ele elaborou

uma resposta que está coerente com o conhecimento científico apresentado nos livros didáticos de física. Nela, identificamos indícios de que A12 entende que em uma colisão entre as bolas há a realização de trabalho por forças dissipativas, provocando perda de energia mecânica do sistema. Assim, sua resposta sugere indícios de aprendizagem significativa para este conceito.

Classificamos na categoria SMD respostas como a do sujeito A10: *“Inicialmente o jogador fornece energia por meio de sua força aplicada. Durante a colisão esta força é transferida um pouco para o atrito e o restante é transferida para velocidade das outras bolinhas”*. O texto elaborado sugere que ele concebe que quando o jogador interage com a bola, no momento em que aplica a força, ocorre uma transferência de energia. Entretanto, nota-se que ele não distingue os conceitos de energia e força, dando a entender que a força permanece no corpo e, após a colisão, pode sair de um corpo e ser transferida para outro. Além disso, entendemos que não está claro para o sujeito que a energia do fóton é transferida para outra modalidade de energia, e não para os objetos. Estes aspectos nos levaram a concluir que este subsunçor está presente, porém não está claro e bem definido (SMD).

Para a questão Q14, classificamos após a análise, três respostas (30%) como subsunçor presente (SP), duas (20%) como subsunçor mal definido (SMD) e cinco (50%) como subsunçor ausente (SA), neste caso todas as respostas estavam em branco.

Respostas como a de A4 foram classificadas na categoria SP: *“Assim como na questão anterior, inicialmente a primeira bolinha possui energia cinética e ao colidir com a segunda bolinha converte um percentual dessa energia cinética é transferida para outra bolinha. O mesmo acontece com as outras bolinhas e é por isso que altura da última bolinha é diferente”*. Percebemos que este sujeito foi capaz de elaborar uma resposta cientificamente aceita, ou seja, percebemos indícios de um entendimento conceitual de que na colisão entre as esferas há a realização de trabalho por forças dissipativas, provocando uma perda de energia mecânica do sistema ao mencionar que um percentual da energia é transferido para a outra, apesar de não explicitar o que acontece com a outra parte do percentual. O uso de termos como *“percentual de energia cinética transferida”*, sugere indícios de aprendizagem significativa para este subsunçor.

Para as respostas classificadas na categoria SMD, por exemplo, o sujeito A10 afirma: *“A energia (força) da primeira bolinha branca será transferida para a segunda e da segunda para a terceira ... cada bolinha oferece uma resistência, como uma força aplicada contra a força exercida, isso faz com que as bolinhas que inicialmente aplicam a força tenham as*

mesmas anuladas em si e transferidas para a seguinte". Neste caso, entendemos que o sujeito A10 esteja utilizando de maneira confusa diversos conhecimentos prévios: energia, força, inércia, 3ª lei de Newton e velocidade. Por exemplo, no início do texto, percebemos que ele não distingue os conceitos de energia e força. Em seguida, utiliza o termo "*resistência*" para descrever a inércia da segunda esfera e, ao final, descreve que a força exercida pela primeira esfera seria totalmente transferida para segunda esfera, o que entendemos como referência à lei de ação e reação.

Também podemos notar que o sujeito A10 tem dificuldades em descrever a sequência de transferência de energia utilizando termos científicos, tais como: energia cinética ou trabalho da força de atrito. Além disso, ele não explica em nenhum momento por que a última esfera se eleva a uma altura menor que a primeira. Portanto, entendemos que o subsunçor Lei de Conservação da Energia está presente em sua estrutura cognitiva, porém este não está totalmente discriminado com relação aos outros conceitos físicos estudados no curso de Física 2 (mecânica). Estes indícios nos levaram a classificar a resposta deste sujeito como SMD.

Em síntese, observando a classificação das respostas encontradas para o subsunçor "Conservação da Energia", os resultados sinalizam que o mesmo também não estava bem definido e estável na estrutura cognitiva da maioria dos sujeitos da pesquisa. Esta constatação é muito importante, pois o entendimento da Conservação da Energia é outro ponto central para aprendizagem significativa do Efeito Fotoelétrico à luz do modelo corpuscular de Albert Einstein, pois a descrição deste fenômeno envolve a transferência um percentual da energia do fóton (E) para função trabalho do metal (W) e o restante para energia cinética dos fotoelétrons ejetados (E_c). Em outras palavras, a energia total inicial (energia do fóton) dever ser igual a soma das energias finais ($W + E_c$).

Considerando esse resultado, decidimos que também seria importante também fazer a correção destas questões na aula posterior, pois mais da metade dos sujeitos não já apresentavam estes subsunçores como bem definidos, claros e estáveis. Também optamos por trazer para sala de um experimento demonstrativo acerca da conservação da energia mecânica, denominado "Pêndulo Interrompido", com o intuito de explorar os conceitos de energia mecânica inicial e final, bem como conceito de trabalho de forças dissipativas.

Buscando uma visão global das respostas, bem como do desempenho dos sujeitos em cada questão, construímos os Gráficos 1 e 2 que ilustram a classificação das respostas dos sujeitos por questão e por sujeito individualmente.

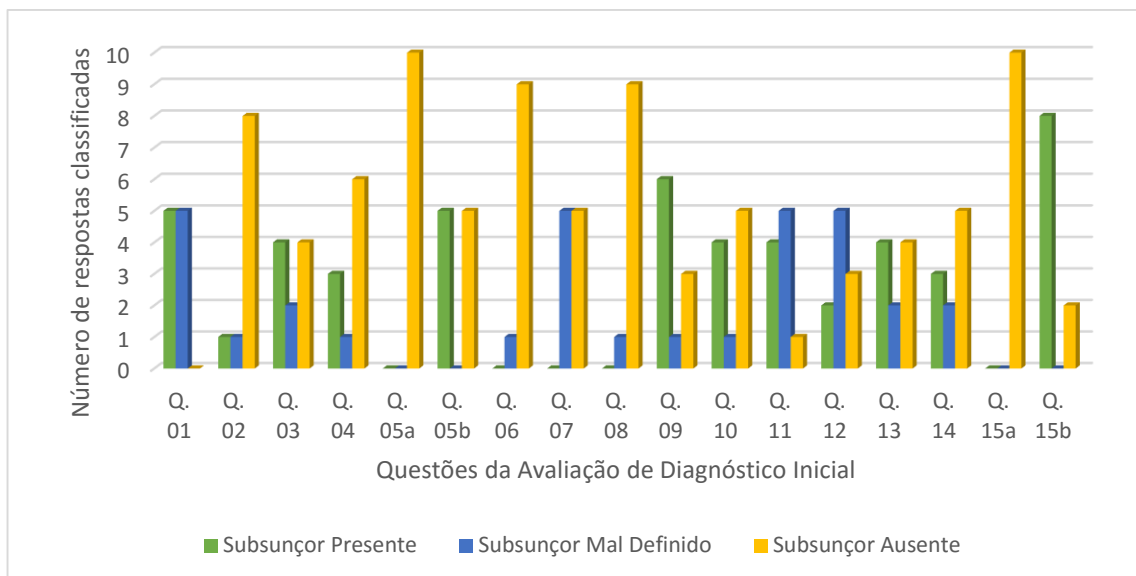


Gráfico 1- Classificação das respostas dos sujeitos por questão - Avaliação de Diagnóstico Inicial

No gráfico 1, podemos visualizar que na maioria das questões os maiores percentuais das respostas foram classificados como subsunçores ausentes (SA). Este fato ocorre principalmente entre Q02 a Q08, as quais se referem aos subsunçores Estrutura da Matéria e Ondas Eletromagnéticas. Note que o número de respostas classificadas como SA diminui significativamente somente a partir da questão 09, quando foi solicitado ao sujeito identificar qual cor apresenta maior e menor comprimento de onda.

Nas questões que envolvem o sistema internacional de unidades, possíveis conversões de unidades e aplicação de fórmulas para resolução de exercícios (Q10, Q11, Q12 e Q15b), o número de sujeitos com subsunçores ausentes é relativamente mais baixo.

No gráfico 2, podemos observar que, de uma maneira global, a ampla maioria dos sujeitos da pesquisa tiveram os quatro subsunçores necessários classificados como mal definido ou ausente (SMD ou SA). Também é possível evidenciar que somente o sujeito A4, A6 e A7 tiveram um desempenho muito diferente o restante da turma. No caso do sujeito A4, ele obteve em dez de suas respostas os subsunçores classificados como presentes (SP), um como mal definidos (SMD) e seis como ausente (SA), ou seja, um desempenho muito acima dos demais. Já os sujeitos A6 e A7 apresentaram um desempenho muito abaixo com relação aos outros sujeitos. O sujeito A7, por exemplo, ele obteve em duas de suas respostas os subsunçores classificados como presentes (SP), duas como mal definidos (SMD) e 13 como ausente (SA).

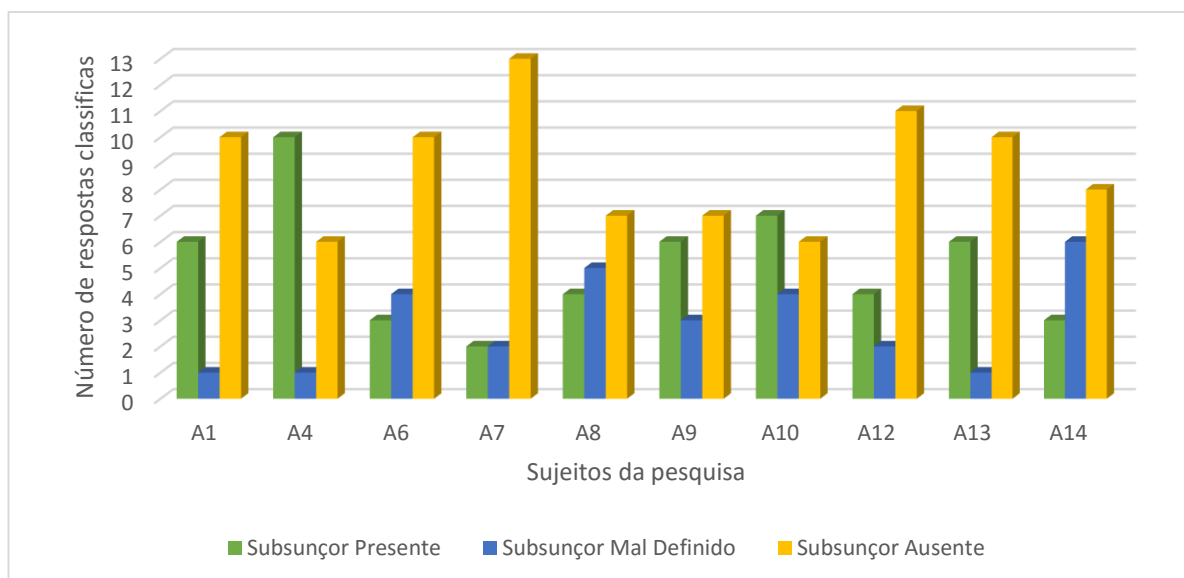


Gráfico 2- Frequência da classificação dos subsunçores por sujeito participante do grupo de pesquisa

Por fim, é importante destacar que o sujeito A4 apresentou um desempenho semelhante ao restante da turma nas respostas encontradas somente para o subsunçor Ondas Eletromagnéticas, evidenciando que este era o principal subsunçor a ser recordado e enfatizados nas aulas seguintes.

Portanto, podemos afirmar que, a grosso modo, pelo menos naquele momento, os sujeitos da pesquisa não tinham em sua estrutura cognitiva os subsunçores necessários para uma aprendizagem significativa dos conceitos físicos a serem estudados no experimento do Efeito Fotoelétrico.

6.2.2 Análise da avaliação final de conhecimento – AFC

Nossa análise tomou como dados as respostas elaboradas pelos sujeitos em oito questões da avaliação final de conhecimento (AFC). Estas questões tinham como objetivo verificar a existência de indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos físicos estudados, a saber: 1) Dualidade onda-partícula para luz (questão Q02); 2) Função trabalho de uma superfície metálica (questões Q03 e Q09); 3) Energia de um fóton (questões Q07 e Q08); 4) Conservação da energia no experimento do Efeito Fotoelétrico (questão Q10); Q5) Intensidade e frequência de luz de acordo com o modelo corpuscular (questões Q04 e Q05); 6) Energia cinética do fotoelétron (questão Q05) e Q7) Fóton (questão Q05).

Nessas questões foram exploradas definições conceituais, explicações de resultados experimentais segundo o modelo corpuscular, situações que exigiam fazer previsões corretas

para o experimento do efeito fotoelétrico, por exemplo, diante da alteração do valor de comprimento de onda ou da intensidade da luz incidente.

Abordamos também os erros mais frequentes neste conteúdo apontados no trabalho de Steinberg et al (1996) e aplicação de equações e conceitos em exercícios presentes nos exames para o ingresso no ensino superior.

Os dados coletados nessas questões da AFC foram analisados com base nas categorias propostas por Cardoso e Dickman (2011), elaboradas a partir do referencial da Teoria da Aprendizagem Significativa:

- **Conceito Suficiente (CS):** classificar respostas que sinalizam entendimento conceitual muito próximo do cientificamente aceito;
- **Conceito Insuficiente (CI):** classificar afirmações na quais identificamos a presença do conceito função trabalho, porém, este encontra-se confuso e ainda mal definido e/ou respostas consideradas incorretas por causa de erros em operações matemáticas ou transformações de unidades de medidas ou manipulações algébricas, desde que o raciocínio utilizado pelo sujeito está correto.
- **Conceito Ausente (SA):** respostas que não sinalizem nenhum entendimento conceitual do novo conceito e aquelas deixadas em branco pelos sujeitos.

Vale lembrar que descartamos da análise os sujeitos que tiveram índice de falta acima de 25% nas aulas, sendo não consideramos as respostas de A11, A15 e A16. Os resultados obtidos com os 13 sujeitos que participaram da AFC, são apresentados a seguir.

Considerando que um mesmo conceito físico foi explorado em questões diferentes, a análise das respostas será apresentada por grupos de questões que envolvem o mesmo conceito. Assim, discutiremos sequencialmente as respostas dos sujeitos com relação aos indícios de aprendizagem significativa para cada novo conceito físico estudado.

6.2.2.1 Dualidade onda-partícula para luz

Na questão 02, foi solicitado aos sujeitos que descrevessem a concepção aceita atualmente pela comunidade científica sobre a natureza da luz, bem como citar dois fenômenos que somente são explicados pelo conceito de onda e outros pelo modelo de partículas. O Quadro 19 indica a questão e a classificação das respostas dos sujeitos.

QUADRO 18: Questão 2 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 02	Descreva a concepção atual que a comunidade científica tem sobre a natureza da luz. Cite dois exemplos que sustentam sua afirmação.												
Sujeitos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	CS	CA	CA	CS	CA	CI	CA	CA	CI	CS	CA	CI	CI

Pelo quadro acima, evidenciamos que foram classificadas nas categorias conceito suficiente (CS), insuficiente (CI) e ausentes (CA), respectivamente três (23,1%), quatro (30,7%) e seis respostas (46,2%). Foram classificadas como CS respostas como a do sujeito A1, por exemplo: *“A luz possui duas naturezas: a de onda e de partícula. Para fenômenos como refração, reflexão, difração, polarização, ressonância e interferência, a mais adaptada é a teoria ondulatória. Já para os efeitos de emissão e produção de luz a mais adaptada é a teoria de partículas”*, O texto por ele elaborado sugere o entendimento do comportamento dual da luz ao citar fenômenos nos quais a luz é interpretada ora como onda (interferência, por exemplo) ora como partícula (produção de luz).

Classificamos na categoria CI, respostas como a do sujeito A13: *“A luz e a matéria podem ser tanto por meio de ondas eletromagnéticas ou por partículas. Para os fenômenos de difração, interferência, é adequado os experimentos de ondas”*. Neste caso, evidenciamos indícios de um entendimento conceitual cientificamente aceito, quando ele afirma que a luz pode ter natureza dual. Porém, considerando que ele citou unicamente fenômenos nos quais a luz é interpretada como um fenômeno ondulatório entendemos que isso pode sinalizar que ele não aprendeu este conceito significativamente ao ponto de citar fenômenos, propriedades ou experimentos que somente podem ser explicados levando-se em conta o modelo corpuscular da luz. Assim, a ausência de exemplos que sustentam a afirmação de a luz pode ter natureza corpuscular nos levou a classificar a resposta deste sujeito como CI.

Todas as seis respostas classificadas na categoria CA foram situações em que os sujeitos não elaboram uma resposta para a questão. O fato de terem deixado em branco pode ser um indicativo de que não aprenderam significativamente o este conceito.

Percebe-se que as atividades propostas para este conceito devem ser modificadas, possibilitando uma apresentação mais clara e detalhada, pois somente sete sujeitos (53,8%) apresentaram indícios da existência deste conceito em suas estruturas cognitivas. Desses, somente três (23,1%) apresentaram o conceito de forma clara e bem definida. Logo, entende-se que este conceito necessite de um tempo maior de exposição em sala de aula, de tal forma

que seja possível explorar em maiores detalhes os fenômenos ondulatórios e corpusculares para a luz.

6.2.2.2 Função trabalho de uma superfície metálica

Duas questões buscavam identificar indícios de aprendizagem significativa associada ao conceito de função trabalho: em Q03 foi solicitado aos sujeitos que explicassem este conceito físico e em Q09 foi relatado que quando se utiliza uma luz de 400 nm de comprimento de onda sobre uma placa metálica de sódio o Efeito Fotoelétrico ocorre, porém, caso essa placa fosse trocada por uma outra de platina, o fenômeno deixaria de acontecer. Nessa última tínhamos como objetivo verificar se os sujeitos seriam capazes de explicar a evidência experimental utilizando adequadamente o modelo corpuscular de Albert Einstein, especificamente, fazendo uso correto do conceito de função trabalho. O Quadro 20 mostra as questões Q03 e Q09 e respectivas classificações das respostas dos sujeitos.

QUADRO 19: Questões Q03 e Q09 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 03		Explique o conceito físico de “função trabalho” de uma placa metálica.													
Questão 09		Sabe-se que incidindo uma radiação eletromagnética de comprimento de onda igual 400 nm sobre uma placa metálica de sódio ocorre a “emissão” de fotoelétrons. Porém, se trocarmos a placa metálica por outra que seja feita de platina, o efeito já não ocorre. Qual a explicação de Einstein para esta observação experimental?													
Sujeitos		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14	
Classificação	Q03	CS	CA	CA	CS	CA	CA	CA	CA	CS	CI	CS	CS	CS	
	Q09	CS	CA	CA	CS	CI	CA	CA	CI	CA	CS	CA	CI	CS	

Conforme evidenciamos no quadro acima, para a questão Q03, foram classificadas nas categorias suficiente (CS), insuficiente (CI) e ausentes (CA), respectivamente seis (46,2%), uma (7,7%) e seis respostas (46,2%).

Foram classificadas como CS respostas como a afirmação do sujeito A12: “*A função trabalho (w , τ , ϕ) é o quanto de energia que será necessária para que os fotoelétrons saiam da placa*”. Percebemos que A12 foi capaz de elaborar um texto que indica que a função trabalho é uma energia mínima que a luz deve transferir para o átomo para que ocorra a emissão de fotoelétrons, o que entendemos que sugere indícios de aprendizagem significativa para conceito de função trabalho de uma placa metálica.

A única resposta de Q03 classificada como CI foi a de A10: “*É a posição dos fotoelétrons dentro da placa, assim, sendo preciso uma energia maior para ejetar as partículas. ($E > \tau$, para ter o efeito)*”. Pode-se observar que ele associa corretamente a função trabalho

com a posição dos fotoelétrons no arranjo molecular, sinalizando indícios de um entendimento conceitual. No entanto, sua definição conceitual foi considerada confusa e pouco precisa, pois a função trabalho não é a posição do elétron, mas é uma quantidade de energia que a luz deve transferir para arrancar o elétron da superfície metálica. Outro aspecto que nos chama a atenção no texto elaborado por A10 é a tentativa de explicar que a energia do fóton deve ser maior para que a função trabalho para que ocorra o Efeito Fotoelétrico, mas isso não é feito de forma clara e explícita.

Para as seis respostas classificadas na categoria CA, tivemos três situações em que os sujeitos deixaram a questão sem resposta e outras três em que elas não estavam associadas à definição científica do conceito, tal como evidenciamos na resposta elaborada pelo sujeito A3: *“É a porcentagem?? que sobra depois do fóton passar pela placa metálica”*. Neste caso parecemos que o sujeito entende que no Efeito Fotoelétrico há um processo de transferência de energia, no entanto, ele associa incorretamente que a função trabalho é a diferença entre a energia do fóton e a energia absorvida pela placa metálica, quando na verdade a função trabalho é a energia absorvida pela placa. Tais aspectos nos levaram a classificar a resposta desse sujeito na categoria CA, concluindo que não houve aprendizagem significativa para este conceito físico.

Para a questão Q09, também indicada no quadro 20, juntamente com a respectiva classificação das respostas elaboradas pelos sujeitos, evidenciamos que somente quatro respostas (30,7%) foram enquadradas na categoria conceito suficiente (CS), três respostas (23,1%) como conceito insuficiente (CI), e outras seis respostas (46,2 %) como conceito ausente (CA).

O sujeito A4, cuja resposta foi classificada como CS, afirma que: *“As ligas que há entre os metais são diferentes, há metais com ligas mais energéticas e menos, por isso a função trabalho é diferente para metais diferentes, então os fótons não tem energia suficiente para arrancar os fotoelétrons na platina, pois as ligas neste material são mais energéticas”*. Neste caso, consideramos que A4 utiliza adequadamente o conceito de função trabalho para explicar porque fótons de uma luz de 400 nm não libera fotoelétrons de uma placa de platina, indicando que há um entendimento conceitual de que a emissão de fotoelétrons está condicionada à energia do fóton ser maior que a energia de ligação dos fotoelétrons com os átomos. Logo, entendemos que tais aspectos sinalizam indícios de aprendizagem significativa.

Para as três respostas classificadas na categoria CI observamos situações em que os sujeitos utilizaram termos como: *“os átomos da platina são mais resistentes”* ou *“a luz tem mais*

facilidade de arrancar fotoelétrons do sódio” ou como afirma A13: “Porque ambos possuem camadas de valência diferentes”.

Neste caso, consideramos que A13 compreende que existe uma condição necessária para ocorrência do efeito fotoelétrico e que esta depende da camada de valência do metal, contudo, além deste conceito não ser conhecido por Einstein em 1905, ele não menciona o conceito de função trabalho ou energia de fóton para sustentar sua resposta, nem utiliza o modelo corpuscular de Einstein. Considerando isso, acreditamos que A13 entende como o Efeito Fotoelétrico ocorre, demonstrando dificuldades na utilização dos novos conceitos físicos na elaboração de explicações. Estas evidências nos levaram a classificar respostas como a de A13 como conceito insuficiente (CI).

Todas as seis respostas classificadas na categoria CA foram situações em que os sujeitos deixaram a questão sem resposta.

Com base na classificação das respostas encontradas para Q03 e Q09, entende-se a utilização de analogias, aspectos de História e Filosofia da Ciência e a utilização do roteiro de atividades com a simulação computacional, podem ter contribuído para que somente sete sujeitos (53,8%) ancorassem o conceito de função trabalho em sua estrutura cognitiva, sendo que destes apenas quatro (30,7%) conseguiram utilizar corretamente este conceito para explicar uma observação experimental referente ao experimento do Efeito Fotoelétrico.

Mesmo considerando os aspectos pontuados por Klassen (2009) sobre a importância da compreensão do conceito de função trabalho na equação de Einstein para aprendizagem do Efeito Fotoelétrico e buscando explorar estratégias diferenciadas para a abordagem conceitual, não conseguimos resultados satisfatórios faz-se necessário possibilitar maior clareza e melhor definição deste conceito. Diante das estratégias já utilizadas, a utilização de textos escritos ou vídeos explicativos²⁴ pode ser uma alternativa viável para suprir esta necessidade.

6.2.2.3 Energia de um fóton

Buscamos indícios de aprendizagem significativa do conceito de energia de um fóton em duas questões: em Q07, apresentamos a equação que relaciona energia de cada fóton com a frequência de luz incidente, porém, primeiramente, os sujeitos deveriam calcular o valor da frequência utilizando a equação fundamental de ondas ($v = \lambda.f$); em Q08 foi relatado

²⁴ Documentário BBC: *The Secrets of Quantum Physic - Part 1 of 2*.

brevemente o funcionamento de Diodo Emissor de Luz, no caso LEDs de cor verde e vermelha, ressaltando que frequência da luz vermelha é menor do que a luz verde.

Para responder corretamente a questão de múltipla escolha formulada, os sujeitos deveriam entender a relação de proporcionalidade da energia do fóton com a frequência de luz, bem como a relação inversamente proporcional entre frequência de luz e seu comprimento de onda.

Pelo quadro acima, podemos observar que oito respostas de Q07 (61,5%) foram classificadas como conceito suficiente (CS) e cinco (38,5%) como conceito ausente (CA). Foram classificadas na categoria CS respostas como a de A3, em que o sujeito transforma corretamente a unidade de medida de comprimento de onda, em seguida utiliza este valor para calcular a frequência de luz e, por fim, determina a energia do fóton a partir da equação de Planck para quantização da energia.

Todas as cinco respostas classificadas na categoria CA foram situações em que os sujeitos deixaram a questão sem resposta, sendo um forte indício de que ele não aprendeu significativamente o este conceito. Apresentamos no Quadro 21 estas duas questões e as respectivas classificações das respostas dos sujeitos.

QUADRO 20 - Questões Q07 e Q08 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 07		A energia de um fóton de frequência f é dada por $E = h.f$, em que h é a constante de Planck. Qual a frequência e a energia de um fóton de luz, cujo o comprimento de onda é igual a 5000 \AA ? Dados: $h = 6,6.10^{-34} \text{ J.s}$ $c = 3.10^8 \text{ m/s}$ $1 \text{ \AA} = 1 \text{ \AA}ngstrom = 10^{-10} \text{ m}$													
Questão 08		Nos diodos emissores de luz, conhecidos como LEDs, a emissão de luz ocorre quando fotoelétrons passam de um nível de maior energia para o outro de menor energia. Dois tipos comuns de LEDs são o que emite luz vermelha e o que emite luz verde . Sejam λ_{verde} o comprimento de onda da luz emitida pelo LED verde e Everde a diferença de energia entre os níveis desse mesmo LED. Para o LED vermelho, essas grandezas são, respectivamente, $\lambda_{vermelho}$ e Evermelho . Considerando-se essas informações, é CORRETO afirmar que a) Everde > Evermelho e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$ b) Everde > Evermelho e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$ c) Everde < Evermelho e $\lambda_{verde} > \lambda_{vermelho}$ d) Everde < Evermelho e $\lambda_{verde} < \lambda_{vermelho}$													
Sujeitos		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14	
Classificação	Q07	CS	CA	CS	CS	CA	CA	CA	CS	CA	CS	CS	CS	CS	
	Q08	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CS	CA	CS	CS	CA	CS	CS	

Das respostas elaboradas para Q08, onze (84,6%) foram conceito suficiente (CS) e duas (15,4%) como conceito ausente (CA). Nenhuma resposta foi enquadrada na categoria CI. Foram classificadas na categoria CS as respostas em que os sujeitos assinalaram unicamente a alternativa (b), a qual afirmava que o comprimento de onda da luz verde é menor do que da luz vermelha e, conseqüentemente, a energia de um fóton de luz verde é maior que da luz vermelha.

Consideramos como CS repostas como a elaborada pelo sujeito A6 escreveu corretamente a equação que relaciona a energia de um fóton com o comprimento de onda de luz incidente e ainda indicou por meio de setas que deveria haver uma relação de proporção inversa entre estas grandezas. Essas observações sugerem, segundo nosso entendimento, que há indícios de aprendizagem significativa para este conceito físico.

Nas duas respostas classificadas na categoria CA, observamos que dois sujeitos (A8 e A12) assinalaram exatamente o contrário do esperado como uma resposta correta, isto é, afirmaram que comprimento de onda luz verde é maior que o da luz vermelha e também indicaram que energia do fóton da luz vermelha é maior que o da luz verde, escolhendo a alternativa (d) como resposta. Tal escolha sinaliza que estes sujeitos não aprenderam significativamente o conceito de energia de um fóton e que ainda não entendem a diferença entre os comprimentos de onda das luzes verde e vermelha.

Nossos resultados concordam os apontamentos de Cardoso e Dickman (2011) quando afirmam os aprendizes facilmente relacionam o aumento da frequência corretamente com o aumento da energia de cada fóton: em Q08 onze sujeitos (84,6%) demonstram entender esta proporção. Com relação ao desempenho dos sujeitos em Q07, entendemos que é necessário ampliar a quantidade exercícios algébricos resolvidos em sala de aula, pois um total de cinco alunos (38,4%) deixou esta questão sem resposta.

6.2.2.4 Conservação da Energia

Na questão Q10, composta por três questionamentos, buscamos indícios de aprendizagem significativa da Conservação de Energia no experimento do Efeito Fotoelétrico. Nela, os sujeitos deveriam aplicar as relações matemáticas empregadas especialmente nas aulas 09 e 10 da unidade de ensino. Para isso, foram fornecidos vários dados, tais como: velocidade da luz, comprimento de onda da luz incidente, função trabalho do metal, constante de Planck e a equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico. Para responder corretamente esta questão, os

sujeitos deveriam calcular a frequência da luz incidente, em seguida a energia de um fóton dessa radiação e, por último, a energia cinética máxima de um elétron emitido. O Quadro 22 mostra esta questão e a classificação das respostas dos sujeitos.

QUADRO 21- Questão Q10 da AFC e respectivas classificações nas categorias de análise

Questão 10	Em um laboratório de física, estudantes fazem um experimento em que a radiação eletromagnética de comprimento de onda de 300 nm incide em uma placa de sódio, provocando a emissão de fotoelétrons. Os fotoelétrons escapam da placa de sódio com energia cinética máxima $E_c = E - W$, sendo E a energia do fóton da radiação e W a função trabalho da placa de sódio. A energia de cada fóton é dada por $E = hf$, sendo h a constante de Planck e f a frequência da radiação. Determine:												
	<p>a) a frequência f da radiação incidente na placa de sódio. b) a energia E de um fóton dessa radiação. c) a energia cinética máxima E_c de um elétron que escapa da placa de sódio.</p> <p>NOTE E ADOTE: Módulo da velocidade da luz no vácuo igual $3.10^8 m/s$; $1 nm = 10^{-9} m$ $h =$ Constante de Planck = $4.10^{-15} eV.s$ W (sódio) = 2,3 eV</p>												
Sujeitos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	CS	CA	CA	CS	CA	CA	CA	CA	CA	CS	CS	CI	CI

Analisando o quadro acima, observamos que somente quatro respostas (30,7%) foram enquadradas na categoria conceito suficiente (CS), duas (15,4%) como conceito insuficiente (CI) e sete respostas (53,8%) como conceito ausente (CA).

As respostas classificadas na categoria CS foram aquelas em que os sujeitos utilizaram as equações corretas e realizaram operações com potência de dez de maneira adequada.

Nas respostas classificadas na categoria CI, observamos que os sujeitos substituíram as grandezas corretamente nas equações, no entanto, A14 utilizou o valor da constante de Planck diferente do valor dado no enunciado, fazendo com que ele errasse o cálculo da energia do fóton e da energia cinética do elétron emitido. Os sujeitos A8 e A13 apresentaram erros relacionados a operações de números com potência de dez. Tais observações sinalizam indícios de aprendizagem significativa da Lei de Conservação da Energia para o Efeito Fotoelétrico, no entanto, devido aos cálculos equivocados ou à falta de atenção na questão, suas respostas foram classificadas na categoria CI.

Para as sete respostas (53,8%) classificadas na categoria CA, tivemos quatro situações em que os sujeitos deixaram a questão sem resposta e outras três em que as respostas estavam incorretas devido a outros fatores além da operação de números com potência de dez, tais como:

divisão incorreta dos números; tomada incorreta dos dados do problema ou utilização de equações que não existem.

Conclui-se, assim, que a unidade de ensino deve ser modificada de modo a ampliar a quantidade e a diversidade de exercícios algébricos resolvidos em sala de aula em nossa unidade de ensino, oferecendo mais oportunidades de se explorar as relações matemáticas apresentadas.

6.2.2.5 Intensidade e frequência de luz de acordo com o modelo corpuscular

A aprendizagem significativa dos conceitos de intensidade e frequência de luz, de acordo como modelo corpuscular de Albert Einstein (1905), foi investigada a partir das questões Q04 e Q05(1) Q05(2) e Q05(3). Em Q04, é questionado qual o parâmetro no experimento do Efeito Fotoelétrico deve ser aumentado para que uma placa metálica emita fotoelétrons. E, em Q05(1) Q05(2) e Q05(3) apresentamos afirmações sobre os conceitos de intensidade e frequência de luz. Como todas eram falsas os sujeitos deveriam reconhecer que eram errôneas e justificar o erro observado. O Quadro 23 mostra estas duas questões e as respectivas classificações das respostas dos sujeitos.

QUADRO 22- Questões Q04 e Q05 (itens 1, 2, 3) e a classificação das respostas de cada sujeito – AFC

Questão 04		Incide-se luz num material fotoelétrico e não se observa a emissão de fotoelétrons. Para que ocorra a emissão de fotoelétrons do mesmo material, basta que se aumente (m) a) a frequência da luz. b) a intensidade da luz. c) o comprimento de onda da luz. d) a intensidade e a frequência da luz. e) a intensidade e o comprimento de onda da luz.													
Questão 05		Justifique as afirmativas falsas: 1. No efeito fotoelétrico podemos utilizar a 1ª Lei de Ohm da eletricidade ($U = R.i$), pois a corrente de fotoelétrons é diretamente proporcional à tensão da bateria. 2. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a energia transportada por um fóton. 3. Intensidade de luz e frequência de luz não são diferentes, pois ambas indicam a quantidade de fótons que há no feixe de luz.													
Sujeitos		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14	
Classificação	Q04	CS	CI	CA	CS	CS	CS	CA	CS	CA	CS	CA	CS	CA	
	Q05(1)	CS	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	
	Q05(2)	CS	CA	CA	CS	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	
	Q05(3)	CS	CA	CA	CS	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	

Considerando a Q04, evidenciamos que sete respostas (53,8%) foram enquadradas na categoria conceito suficiente (CS), uma (7,7%) em conceito insuficiente (CI) e cinco (38,5 %) como conceito ausente (CA).

As respostas classificadas na categoria CS foram aquelas nas quais os sujeitos assinalaram como resposta correta a alternativa (c), a qual afirmava que para que ocorra a emissão de fotoelétrons de uma placa metálica deve-se obrigatoriamente aumentar a frequência de luz incidente. As respostas classificadas nesta categoria sugerem indícios de aprendizagem significativa, pois para acertá-la o sujeito deve compreender que a ocorrência do Efeito Fotoelétrico está condicionada a energia do fóton ser maior que o valor da função trabalho do metal e que somente a frequência de luz tem influência na energia dos fótons.

Somente a resposta de A2 foi classificada na categoria CI, neste caso ele assinalou a alternativa (d), indicando que além do aumento na frequência deveria haver também um aumento na intensidade de luz. Esta observação sinaliza que para esse sujeito não está totalmente clara a definição de intensidade de luz como grandeza física associada ao número de fótons, porém, ele reconhece que a frequência de luz é grandeza que interfere na ocorrência do Efeito Fotoelétrico.

Nas cinco respostas classificadas na categoria CA os sujeitos indicaram que deveria ser aumentada a intensidade de luz ou o valor do comprimento de onda, assinalando como resposta a alternativa (e). Esta resposta difere totalmente da resposta esperada, pois a intensidade de luz não influencia na energia do fóton e a relação entre comprimento de onda e energia do fóton é inversamente proporcional. Tais evidências sugerem que para esses sujeitos não ocorreu aprendizagem significativa do conceito estudado.

Para a questão Q05(1), os resultados foram: uma única resposta (7,7%) como conceito suficiente (CS), sujeito A1, e as outras 12 respostas (93,3%) como conceito ausente (CA), neste último caso estes sujeitos não reconheceram a afirmativa 1 como errônea.

Em seu texto o sujeito A1 afirmou: *“Não podemos utilizar a 1ª Lei de Ohm, pois no efeito fotoelétrico corrente elétrica e tensão não são diretamente proporcionais”*. Entendemos que ele compreende que no Efeito Fotoelétrico, diferentemente do que acontece em circuitos elétricos, a corrente elétrica é causada pela radiação da luz incidente. Assim, consideramos que sua resposta fornece indícios de que ele entende que a bateria não é o fator determinante para a ocorrência do efeito.

Para as questões Q05(2) e Q05(3) evidenciamos a mesma classificação das respostas: três (23,1%) foram classificadas na categoria conceito suficiente (CS) e dez (76,9%) como conceito ausente (CA).

No caso das respostas classificadas na categoria CS, por exemplo, o sujeito A4 afirma em Q05(2) que *“Somente a frequência indica a quantidade de energia transportada ($E=h.f$)”* e em Q05(3) que *“Somente a intensidade indica o nº de fótons que há no feixe de luz”*. Consideramos que o sujeito A4 reconhece que os conceitos de intensidade e frequência de luz são diferentes, isto é, a frequência de luz indica a energia transportada por um fóton enquanto que a intensidade de luz indica o número de fótons. Assim, sua afirmação está coerente com o conceito científico atualmente aceito, por isso entendemos que sua resposta fornece indícios de aprendizagem significativa.

Em relação às dez respostas classificadas na categoria CA, observamos que quatro sujeitos não reconheceram que as afirmações estavam incorretas e os outros cinco sujeitos, apesar de reconhecerem o erro de uma ou outra, não elaboraram justificativas coerentes com os conceitos científicos. Por exemplo, o sujeito A9 afirma: *“Ambas[as afirmações] indicam a quantidade de fótons que há no feixe de luz”*. Já o sujeito A3 afirma: *“A intensidade de luz [nos dois casos] indica a energia transportada e a frequência indica o número de fótons que há no feixe de luz”*. Percebemos nesses dois exemplos que os sujeitos não conseguiram reconhecer que estes conceitos são diferentes, logo, afirmaram o contrário do que aceito cientificamente para ambos conceitos físicos. Tais observações sugerem que para estes sujeitos não há indícios de aprendizagem significativa.

Esses resultados são semelhantes aos evidenciados na literatura. Segundo Steinberg et al (1996), a não diferenciação entre os conceitos de intensidade de e frequência de luz seria uma dificuldade específica que impede a aprendizagem significativa do modelo corpuscular de Einstein (1905), pois classicamente é a intensidade de uma onda eletromagnética que indica a quantidade de energia transportada enquanto que no estudo do Efeito Fotoelétrico esta energia agora é indicada pela frequência de luz. Cardoso e Dickman (2011, p. 98) também relataram dificuldade tal como evidenciamos, e pontuam que um dos problemas pode ser consequência de “[...]pouca clareza no material apresentado nas relações que envolvem a intensidade da luz, frequência, e energia do fóton”. Aspectos que acreditamos que também podem ter influenciado nossos resultados.

Ressaltamos que estamos trabalhando com sujeitos de nível médio, entendemos que eles recentemente aprenderam os conceitos clássicos de intensidade e frequência de luz e, agora, apresentam dificuldades para limitarem esta concepção aos fenômenos ondulatórios, isto é, ao eletromagnetismo clássico. Nossos resultados, assim como os obtidos nos trabalhos citados

acima, sugerem que esta tarefa, em termos de integração dos novos conceitos à estrutura cognitiva, de forma alguma é trivial para estes sujeitos.

Acreditamos que, a aprendizagem dos conceitos de intensidade e frequência de luz pode ser considerada um ponto crítico de nossa unidade de ensino. Mesmo com a utilização de aspectos de História e Filosofia da Ciência e ferramentas tecnológicas com o objetivo de propiciar formas diferenciadas de abordagem, que contribuíssem para com a motivação para aprender significativamente, não obtivemos resultados diferentes dos já pontuados na literatura.

Uma alternativa seria a adição de atividades que visem a distinguir e clarificar estes conceitos. Logo, considerando as ferramentas de ensino que já lançamos mão, a utilização de um experimento demonstrativo do Efeito Fotoelétrico, ou um vídeo exibindo tal experiência, onde seja possível manipular a frequência de luz e a intensidade de luz, parecem alternativas viáveis para suprir esta necessidade.

6.2.2.6 *Fóton*

A aprendizagem significativa do conceito de fóton foi investigada com a questão Q05(4), na qual é afirmado que o fóton possui uma carga elétrica e, esperava-se que os sujeitos reconhecessem que esta afirmativa está errada e justificassem este erro.

A atribuição de uma carga elétrica ao fóton, tal como existe para o elétron e o próton, é outra dificuldade específica que impede a aprendizagem significativa do modelo corpuscular de Einstein (1905) apontada pelo trabalho Steinberg et al (1996). Segundo estes autores, os alunos frequentemente associam uma carga elétrica ao fóton devido à natureza eletromagnética da luz, assim, os alunos concluem erroneamente que os fótons também devem apresentar propriedades elétricas e magnéticas.

O Quadro 24 mostra a questão número 05 (item 4) e a classificação das respostas dos sujeitos.

QUADRO 23 - Questão 05 (item 4) e a classificação das respostas de cada sujeito – AFC

Questão 05)	Justifique as afirmativas falsas: 4. O fóton é uma partícula carregada eletricamente.												
Sujeitos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	CA	CA	CA	CS	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CA

Analisando o quadro, observamos que somente uma resposta (7,7%) foi enquadrada na categoria conceito suficiente (CS) e outras 12 (92,3%) como conceito ausente (CA), pois estes sujeitos não reconheceram esta afirmativa como errônea, isto é, estes sujeitos possivelmente concordaram que os fótons apresentam propriedades eletromagnéticas.

Na resposta do sujeito A4, categorizada como CS, ele afirma: “Fóton não possui carga elétrica, ele é igual ao termo quanta de energia”. Neste caso, percebemos que o sujeito compreende que o termo/conceito fóton se refere à uma certa quantidade discreta de energia transportada por um feixe de luz. Consideramos que o texto apresenta indícios de aprendizagem significativa para o conceito de fóton, pois ele não atribui propriedades elétricas para o fóton e corretamente o associa o conceito de quantização de energia.

Estes resultados sinalizam a necessidade de apresentar de forma mais clara as características dos fótons, enfatizando não apenas a relação energia e frequência de luz. Uma possibilidade seria a utilização de texto sobre partículas mediadores de forças, na última aula da unidade de ensino.

6.2.2.7 Energia cinética dos fotoelétrons

A aprendizagem significativa do conceito de energia cinética dos fotoelétrons foi investigada na questão Q05(5), na qual os sujeitos deveriam reconhecer que é possível aumentar o valor dessa energia por meio da redução do comprimento de onda da luz incidente.

O Quadro 25 mostra a questão número 05 (somente item 5) e a classificação das respostas dos sujeitos.

QUADRO 24 - Questão Q05(5) e a classificação das respostas de cada sujeito na AFC

Questão 05	Justifique as afirmativas falsas: 5. A energia cinética de um fotoelétron pode ser aumentada se aumentarmos também o valor do comprimento de onda.												
Sujeitos	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A12	A13	A14
Classificação	CI	CA	CS	CS	CS	CI	CA	CS	CI	CS	CA	CS	CI

Podemos observar que seis respostas (46,2%) foram enquadradas na categoria conceito suficiente (CS), quatro (30,7%) como conceito insuficiente (CI) e outras três (30,7%) como conceito ausente (CA).

Para exemplificar o grupo das respostas classificadas na categoria CS, citamos a afirmação do sujeito A5: “Quando diminuimos o valor de λ da luz a E_c dos fotoelétrons aumenta”. Neste caso, percebemos que ele cita corretamente a relação de proporcionalidade

inversa entre as grandezas envolvidas, sinalizando que há indícios de aprendizagem significativa do conceito analisado.

Para as quatro respostas classificadas na categoria CI, observamos que os sujeitos reconheceram que a mudança no valor do comprimento de onda influencia na energia cinética dos fotoelétrons, porém, eles não afirmaram se a energia cinética dos fotoelétrons é diretamente ou inversamente proporcional ao comprimento de onda. O sujeito A14, por exemplo, considera a afirmação “*Falsa, [pois a energia cinética dos fotoelétrons] pode sim ser aumentada*”. Neste caso percebemos que há indício de um entendimento parcial do conceito analisado, no entanto, não temos evidências de que o sujeito compreende a relação entre as duas grandezas.

As três respostas classificadas na categoria CA foram aquelas em que os sujeitos não foram capazes de reconhecer que o comprimento de onda da luz incidente influencia na energia cinética dos fotoelétrons. Tais observações indicam que para estes sujeitos não há indícios de aprendizagem significativa deste conceito estudado.

Segundo o trabalho de Steinberg et al (1996), os alunos frequentemente têm dificuldades em entender que energia cinética dos fotoelétrons ejetados corresponde a uma parte da energia do fóton da luz incidente. Como consequência eles não compreendem que a alteração na energia cinética somente é possível com uma alteração na energia do fóton, e esta por sua vez, somente pode ser alterada pela variação do comprimento de onda do feixe de luz incidente.

Os resultados obtidos sinalizam que a dificuldade pontuada na literatura também foi evidenciada em nosso grupo de pesquisa. A unidade de ensino parece não ter contribuído para que os sujeitos compreendessem o Efeito Fotoelétrico como um processo de transferência de energia.

6.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Para sintetizar a classificação das respostas na avaliação final de conhecimento construímos o Quadro 26, no qual indicamos os conceitos físicos investigados, o percentual de classificação das respostas de acordo com as categorias propostas e a questão em que estes conceitos foram abordados.

QUADRO 25 - Síntese da classificação das respostas dos sujeitos da pesquisa para cada novo conceito físico investigado em CS conceito suficiente, CI conceito insuficiente e CA conceito ausente

Conceito	Questões	CLASSIFICAÇÃO		
		Conceitos	CI	CA
Dualidade Onda-Partícula	Q02	23,1%	30,7%	46,2%
Função trabalho	Q03	46,2%	7,7%	46,2%
	Q09	30,7%	23,1%	46,2%
Energia de um fóton	Q07	61,5%	0,0%	38,5%
	Q08	84,6%	0,0%	15,4%
Lei de Conservação da Energia	Q10	30,7%	15,4%	53,8%
Intensidade e Frequência de luz	Q04	53,8%	7,7%	38,5%
	Q05(1)	7,7%	0,0%	93,7%
	Q05(2) Q05(3)	23,1%	0,0%	76,9%
Energia Cinética dos fotoelétrons	Q05(5)	38,5%	30,7%	30,7%
Fóton	Q05(4)	7,7%	0,0%	92,3%

FONTE: Dados da Pesquisa

Ao observarmos no quadro somente o percentual de respostas classificadas como conceito suficiente (CS), evidenciamos um percentual acima de 50% somente em três questões, as quais investigavam a aprendizagem significativa dos conceitos de energia de um fóton (Q07 e Q08) e intensidade e frequência de luz (Q04).

Destacamos também a questão Q05(5), onde era abordado o conceito de energia cinética dos fotoelétrons, as respostas classificadas em CS apresentam resultado superior às outras duas categorias, apesar do percentual inferior a 50%.

Por outro lado, levando-se em conta somente o percentual de respostas classificadas como Conceito Ausente (CA), observamos que ela apresentou percentual acima de 50% em quatro momentos, os quais se referem à diferenciação dos conceitos de intensidade e frequência de luz, Q05(1), Q05(2) e Q05(3) e as características dos fótons, em Q05(4).

Em outras três questões, associadas ao conceito de dualidade onda partícula (Q02), função trabalho (Q09) e aplicação da lei da conservação da energia (Q10), evidenciamos que o quantitativo de respostas classificadas em CA superior ao das outras duas categorias, com percentual inferior a 50%.

Por fim, podemos ressaltar o fato de que o percentual de respostas classificadas nas categorias CA e CS foi igual na questão Q03, a qual investigava a aprendizagem significativa do conceito físico de função trabalho de um metal.

Os resultados indicam que em sete das 13 questões da avaliação final de conhecimento, os sujeitos elaboram respostas que sinalizam ausência do conceito científico explorado na unidade de ensino. Tais constatações nos levam a considerar que não houve uma aprendizagem significativa para seis dos sete dos novos conceitos físicos apresentados no estudo do Efeito

Fotoelétrico, mas, na maioria das vezes, identificamos evidências que sinalizam um entendimento parcial dos novos conceitos físicos estudados.

O novo conceito físico que representa nossa única exceção está associado à aprendizagem do conceito de energia de um fóton, explorado nas questões Q07 e Q08, as quais apresentam um percentual de respostas classificadas como CS superior a 50%.

Para facilitar a visualização dessas constatações elaboramos o Gráfico 3, no qual indicamos o quantitativo de respostas classificadas em cada categoria, para cada questão.

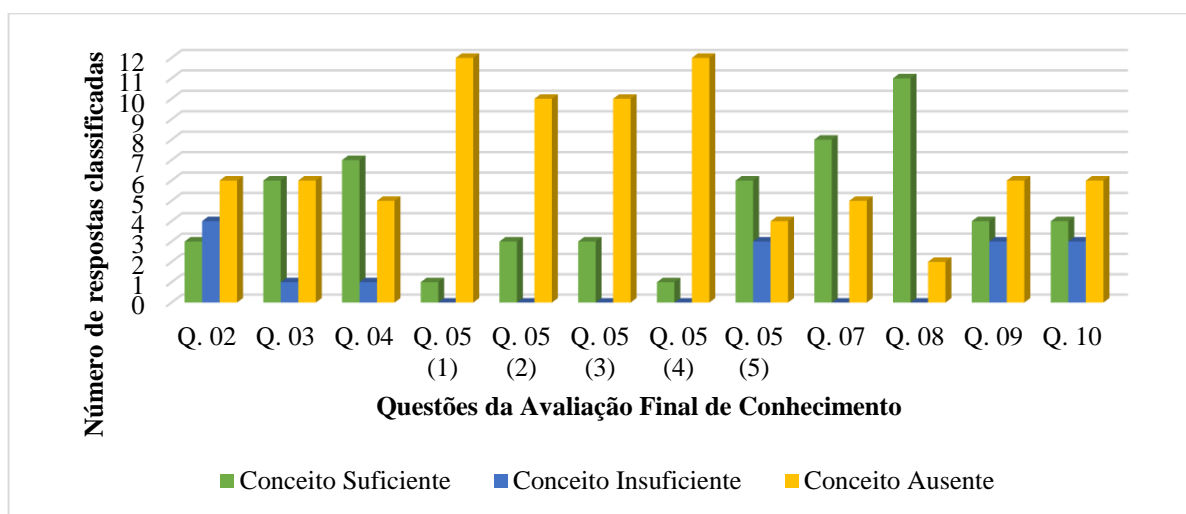


Gráfico 3 - Distribuição das respostas dos sujeitos por questão – Avaliação Final de Conhecimento

Podemos observar no gráfico que somente nas questões Q04, Q07 e Q08, mais da metade do número dos sujeitos apresentam em suas respostas expressões entendidas como cientificamente aceitas, indicando indícios de aprendizagem significativa e por isto foram classificadas na categoria conceito satisfatório (CS).

Por outro lado, quando os sujeitos foram questionados sobre a concepção atual da natureza da luz, influência da alteração da intensidade e da frequência de luz no experimento do Efeito Fotoelétrico, explicação de observações experimentais de acordo com o modelo corpuscular ou resolução de exercícios envolvendo aplicação de equações (questões Q02, Q05 (itens 1, 2, 3, 4), Q09 e Q10), a maioria das respostas sugerem ausência de entendimento conceitual, o que nos levou a classificá-las como CA.

No Gráfico 4 ilustramos o quantitativo da classificação dos novos conceitos por sujeitos participantes da pesquisa.

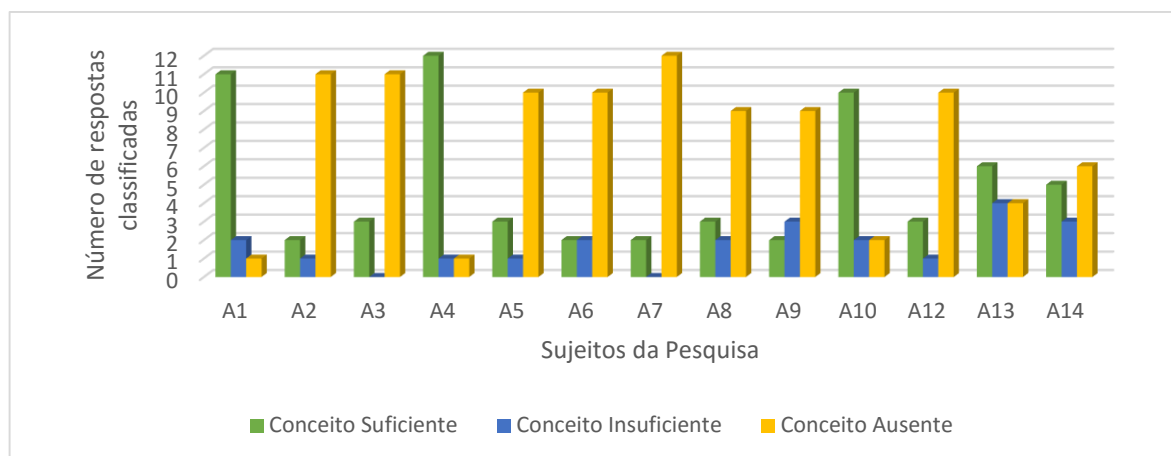


Gráfico 4 - Frequência da classificação dos novos conceitos por sujeito participante do grupo de pesquisa

Este gráfico 4 nos permite observar que a maioria dos sujeitos participantes da pesquisa apresentaram os novos conceitos de forma insuficiente ou ausente ao final da aplicação de nossa unidade de ensino.

Pelo gráfico observamos que somente cinco sujeitos, A1, A4, A10, A13 e A14, que representam 38,4% do total, tiveram um desempenho consideravelmente melhor que o restante do grupo na avaliação final de conhecimento. Vale salientar que o desempenho desses outros sujeitos é muito semelhante, não apresentando mais que três respostas classificadas como Conceito Suficiente.

A constatação de que 61,6% dos sujeitos tiveram dificuldades em aprender significativamente o novo conteúdo nos levou a refletir sobre a estrutura e aplicação da unidade de ensino e os tipos de questões presentes na avaliação final de conhecimento.

Ausubel (2003) enfatiza que para determinar se um conteúdo foi assimilado de maneira realmente significativa não se deve exigir uma repetição exata dos conceitos, mas deve expor o sujeito a uma situação diferente, nunca vivenciada, que exija dele uma máxima transferência e transformação do conceito adquirido.

É importante ressaltar que existem divergências entre os pesquisadores da área de ensino sobre o entendimento do que seria uma “situação diferente, nunca vivenciada” para o sujeito, pontuada por Ausubel (2003).

Silva e Martins (2013) e Cardoso e Dickman (2011), por exemplo, ao refletirem sobre isso, apontam que a resolução de um exercício inédito de física, no qual se exige que o sujeito faça uma interpretação de um enunciado e utilize equações para chegar a uma resposta objetiva,

seria uma situação diferente e adequada para avaliar os indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos.

Dante (1988) e Mayer (2002) argumentam que devemos expor o sujeito a uma situação problema não familiar, na qual ele utiliza um ou mais procedimentos para realizar uma tarefa diferente, e o resultado nos possibilita verificar a ocorrência ou não da aprendizagem significativa.

Se avaliarmos nossas questões da AFC segundo o entendimento de Dante (1988) e Mayer (2002) para situação nova nosso instrumento de coleta de dados pode não ser os mais adequados para avaliar a aprendizagem significativa.

Cientes da complexidade dessa diferenciação entre o que seria um exercício e ou um problema que representaria uma situação nova para o sujeito resolver, justificamos nossa escolha a partir do entendimento de autores como Dante (1988), Clemente (2004) e Soares e Pinto (2013). Eles, ao refletirem sobre a situação nova que possibilite uma avaliação mais precisa de uma aprendizagem significativa, pontuam que essa pode ser uma situação problema ou um exercício inédito, pois isso depende da estrutura cognitiva do sujeito, que fará o julgamento da mesma.

O que pode ser um problema para um sujeito pode não o ser para um outro que esteja numa dimensão superior relacionada aos seis tipos Processos Cognitivos pontuados, por exemplo, na Taxonomia de Bloom (lembrar, entender, aplicar, analisar, avaliar e criar).

Considerando o exposto e o entendimento de que as questões propostas em nossa avaliação final de conhecimento representam situações novas tal como pontuam Silva e Martins (2013) e Cardoso e Dickman (2011), pois são exercícios inéditos, decidimos por avaliar o grau da aprendizagem significativa, a partir dos seis tipos de processos cognitivos da Taxonomia de Bloom Revisada (TBR).

De acordo com a TBR, há duas dimensões distintas a serem levadas em conta, a dimensão relacionada aos seis tipos Processos Cognitivos (Lembrar, Entender, Aplicar, Analisar, Avaliar e Criar) e a dimensão associada aos quatro tipos de Conhecimentos (Factual, Procedimental, Conceitual e Metacognitivo).

Utilizamos como ferramenta a Tabela Bidimensional da Taxonomia de Bloom para analisar as questões propostas em nossa avaliação final de conhecimento e as respectivas respostas dos sujeitos. Nessa tabela, na coluna vertical encontra-se a dimensão Conhecimento

e na coluna horizontal a dimensão Processos Cognitivos. É importante lembrar que um mesmo objetivo educacional poderá ser inserido em mais de uma célula, ou seja, uma questão poderá receber mais de uma classificação.

O Quadro 27 apresenta a classificação das questões da AFC considerando os processos cognitivos e o tipo de conhecimento exigido. Também é apresentada para cada questão, entre parênteses, a sua respectiva subcategoria na dimensão Processo Cognitivo.

Com relação à Dimensão Conhecimento, pelo quadro 27, percebe-se que nossas questões privilegiaram o Conhecimento Conceitual (oito questões) em comparação com o Conhecimento Factual (cinco questões).

QUADRO 26 - Tabela Bidimensional de Bloom preenchida com a numeração das questões da AFC

Dimensão Processo Cognitivo	Dimensão Conhecimento			
	Factual	Procedimental	Conceitual	Metacognitivo
1. Lembrar	Questão 01 (1.2) Questão 07 (1.1) Questão 08 (1.1) Questão 05 (1.1)	-	Questão 02 (1.2) Questão 03 (1.2) Questão 04 (1.2)	-
2. Entender	Questão 06 (2.2)		Questão 05 (2.2) Questão 08 (1.1) Questão 09 (2.2)	-
3. Aplicar	-	-	Questão 07 (1.1) Questão 10 (3.1)	-
4. Analisar	-	-	-	-
5. Avaliar	-	-	-	-
6. Criar	-	-	-	-

No primeiro, estão envolvidos os conhecimentos de classificação e categorização, de princípios e generalizações e de teorias, modelos e estruturas. Essa dimensão está relacionada à inter-relação dos elementos básicos num contexto mais elaborado, no qual os sujeitos devem ser capazes conectar elementos mais simples a estruturas e modelos já existentes.

No segundo, tem-se conhecimentos da terminologia, de detalhes e elementos específicos. Nesse sentido, o sujeito deve dominar o conteúdo básico, a fim de que consiga realizar e resolver exercícios ou problemas apoiados nesse conhecimento. Nessa dimensão os fatos não precisam ser entendidos ou combinados, apenas reproduzidos tal como apresentados no processo de ensino.

Ressaltamos que as questões Q07 e Q08 também foram classificadas na dimensão Conhecimento Factual porque elas já tinham sido apresentadas aos sujeitos durante as resoluções de listas de exercícios. Assim, devemos levar em conta que a possibilidade do bom desempenho dos sujeitos nestas questões ter sido resultado apenas de memorização.

Os Conhecimentos Procedimentais, aqueles de conteúdo específico, habilidades e algoritmos, de técnicas específicas e métodos, de critérios e percepção de como e quando usar um procedimento específico, não foram explorados em nossas questões, assim como os Conhecimentos Metacognitivos, aqueles de conhecimento estratégico; sobre atividades cognitivas incluindo contextos preferenciais e situações de aprendizagem e autoconhecimento.

Com relação à Dimensão Processos Cognitivos, evidenciamos no quadro 27 que as questões privilegiaram o processo cognitivo lembrar (sete questões), seguido por entender (quatro questões) e, aplicar (duas questões).

O Processo Cognitivo lembrar está relacionado a simplesmente reconhecer e/ou reproduzir ideias e conteúdos. Requer distinguir e selecionar uma determinada informação e reproduzir ou recordar. Está mais relacionado à busca por uma informação relevante memorizada. Na TBR, é representado por duas subcategorias: reconhecendo e reproduzindo.

O Processo Cognitivo entender está associado à interpretação, a inferência e a comparação de informações. Nele, espera-se que o sujeito seja capaz de estabelecer uma conexão entre os novos conceitos com outros já previamente adquirido, construindo o significado dos novos conceitos. De acordo com a TBR, esse processo pode ser representado por sete subcategorias: interpretando; exemplificando; classificando; resumindo; inferindo; comparando e explicando.

Por fim, o Processo Cognitivo aplicar, o qual está relacionado a executar ou usar um procedimento numa situação específica e pode também abordar a aplicação de um conhecimento numa situação nova. De acordo com a TBR, pode ser representado por duas subcategorias: executando (situação familiar) e implementando (situação totalmente inédita).

Os Processos Cognitivos analisar, avaliar e criar não foram encontrados nas questões propostas em nossa avaliação final de conhecimento.

QUADRO 27 - Classificação das questões de acordo com os novos conceitos, com o tipo de conhecimento e o tipo de processo cognitivo exigido

Legend a	Conceito	Questões	Conhecimento	Processo Cognitivo		
				Lembrar	Entender	Aplicar
A	Dualidade Onda-Partícula	Q02	Conceitual			
B	Função trabalho	Q03	Conceitual			
		Q09	Conceitual			
C	Energia de um fóton	Q07	Factual			
		Q08	Factual			
D	Intensidade e Frequência de luz	Q04	Conceitual			
		Q05(1)	Conceitual			

		Q05(2) e Q05(3)	Conceitual			
E	Fóton	Q05(4)	Factual			
F	Energia Cinética do Elétron Emitido	Q05(5)	Conceitual			
G	Lei de Conservação da Energia	Q10	Conceitual			

Elaboramos o Quadro 28 a fim de sintetizar os resultados desta análise. Nele, mostramos como cada novo conceito foi abordado na avaliação final, isto é, qual tipo de conhecimento e processo cognitivo foram exigidos nas questões. Também é possível observar o predomínio do Conhecimento Conceitual (70% das questões) e do Processo Cognitivo Lembrar (60% das questões).

Por fim, utilizando a análise das respostas dos sujeitos da pesquisa em cada uma destas questões, foi possível avaliar o desempenho dos sujeitos de acordo com o processo cognitivo exigido na questão.

Para os conceitos de função trabalho, intensidade de luz e frequência de luz, energia cinética dos fotoelétrons emitidos, visto que que o quadro acima evidencia que estes conceitos foram investigados em questões com processos cognitivos diferentes, foi possível inferir e visualizar a relação entre o desempenho dos sujeitos e o processo cognitivo exigido. Evidenciamos que para questões envolvendo o nível imediatamente acima, o desempenho dos sujeitos é menor do que nas questões envolvendo o nível anterior, embora a literatura aponte que nem sempre deva ocorrer (MAYER, 2002; FERRAZ e BELHOT, 2010).

O Gráfico 5 abaixo ilustra o desempenho dos sujeitos em relação aos novos conceitos estudados. As letras A, B,...,G são referentes à legenda apresentada no Quadro 28 acima.

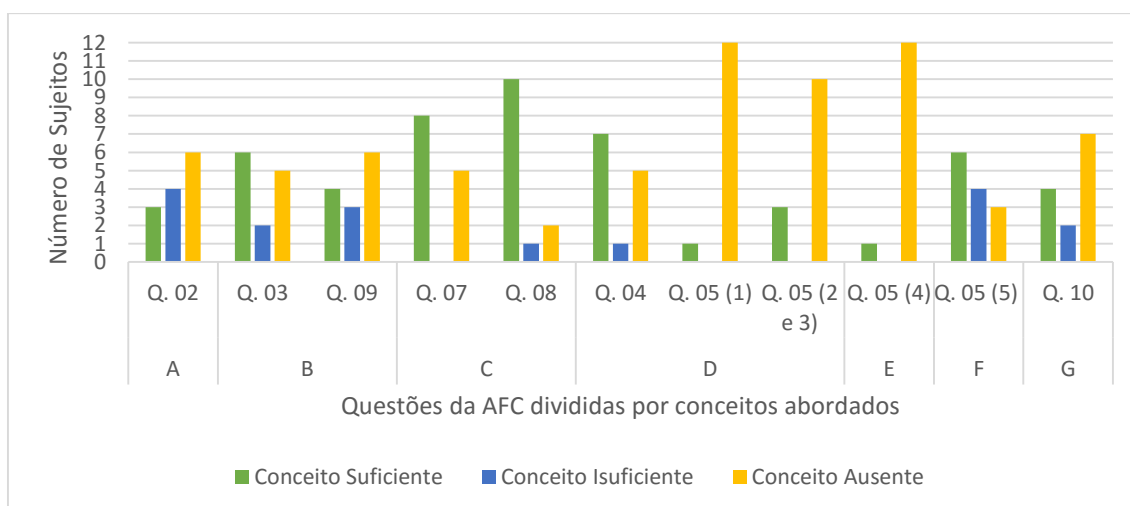


Gráfico 5 - Classificação das respostas dos sujeitos da pesquisa por cada novo conceito estudado

Conforme apontamos anteriormente, quando comparamos o desempenho dos sujeitos nas questões dos grupos B, D, F e G, notamos uma nítida diminuição do número de respostas classificadas como conceito suficiente (CS) em cada grupo. Toma-se como exemplo a classificação das respostas presentes no grupo D, as quais referem-se aos conceitos de intensidade e frequência de luz. Na questão Q04, tem-se o nível de processo cognitivo lembrar, enquanto que na questão Q05(1), Q05(2) e Q05(3) tem-se o nível cognitivo entender, ou seja, imediatamente superior.

Também na questão Q04, observa que cerca de 54% das respostas foram classificadas como CS, enquanto que na questão Q05(2) e Q05(3) somente 23% das respostas tiveram esta mesma classificação e na questão Q05(1) somente cerca de 8%. Embora os percentuais sejam diferentes, o mesmo ocorre para as questões do grupo B e para a comparação entre os grupos F e G.

No gráfico 5, acima, nos chama atenção o elevado número respostas classificadas como CS para as questões que compõe o grupo C (Q07 e Q08). Estas questões se referem à investigação da aprendizagem do conceito de energia de um fóton. De acordo com a TBR podemos explicar este fato da seguinte maneira: o quadro 14, apresentado anteriormente, indica que em ambas as questões foi exigido do sujeito apenas conhecimento factuais no nível de processo cognitivo lembrar. Deste modo, para responder corretamente, não era necessário que os sujeitos tivessem atribuído significados ao conceito de energia de um fóton, de modo a integrá-lo em sua estrutura cognitiva, mas apenas foi exigido que os sujeitos reproduzissem este conceito tal como lhe foi apresentado. Assim, eles simplesmente tiveram de buscar algumas informações relevantes em suas memórias no momento da avaliação.

Entretanto, nossos resultados indicam que em outras questões, onde também eram exigidos somente conhecimentos factuais, no nível processo cognitivo lembrar, os sujeitos da pesquisa tiveram dificuldades para elaborar respostas consideradas corretas. Para sustentar esta afirmação, iremos analisar as respostas encontradas questões Q01 e Q06 da avaliação final de conhecimento.

Em Q01, foi exigido que os sujeitos listassem duas aplicações tecnológicas que fazem uso do Efeito Fotoelétrico. Podemos considerar que tal solicitação exige do sujeito apenas que recorde a discussão realizada na 5ª aula. Nesta aula, realizou-se a leitura de dois textos: um sobre o funcionamento de dispositivos de carga acoplada (*chips* CCD) e outro sobre sensores

cuja resistência elétrica é dependente da intensidade luz (sensor LDR). Ao final da aula, ainda foi comentado outras tecnologias baseadas no efeito fotoelétrico, tais como células fotovoltaicas, sensores fotossensíveis, controle remoto, entre outros.

Assim, o propósito desta questão era evidenciar se os sujeitos eram capazes, entre outros aspectos, após o término de aplicação de nossa unidade de ensino, de relacionar o conteúdo de Física Moderna e Contemporânea abordado em sala de aula com princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna.

Pela análise das respostas encontradas, observamos que somente sete sujeitos (54%) conseguiram lembrar de dois dispositivos tecnológicos baseados no Efeito Fotoelétrico, neste caso mais da metade das respostas indicavam placas solares, postes de luz da rede pública e controle remoto. Um sujeito (7,7%) lembrou de apenas um dispositivo, citando a célula fotovoltaica como exemplo, e outros cinco sujeitos (38,5%) deixaram a questão sem qualquer tipo de resposta.

Evidenciamos, de forma subjetiva, resultados positivos no interesse dos sujeitos por causa da utilizamos de elementos de História e Filosofia da Ciência durante as aulas, no entanto, tivemos a curiosidade de também verificar qual o real efeito destas aulas para à refutação dos mitos referentes à história do Efeito Fotoelétrico.

Na questão Q06, era exigido que os sujeitos julgassem quatro afirmativas sobre a história do Efeito Fotoelétrico. Estas afirmativas, também chamadas de mitos, foram apresentados aos sujeitos nas aulas em que utilizamos aspectos de História e Filosofia da Ciência (aulas 04, 05, 10 e 11). Assim, nesta questão, apontamos os quatro mitos evidenciados pelo trabalho de Klassen et al (2009), na forma de afirmativas, para que os alunos julgassem a veracidade destas afirmações. A quatro afirmativas foram: 1) Einstein apenas aplicou o trabalho de Planck de 1900; 2) A teoria de Einstein explicava fatos inexplicáveis pela teoria eletromagnética; 3) Os resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico são inexplicáveis sem a hipótese de fótons e 4) Millikan fez a verificação final da teoria de Einstein e após isto, ela foi amplamente aceita.

Pela análise das respostas elaboradas pelos sujeitos, observamos que três dos quatro mitos da história do experimento do Efeito Fotoelétrico não foram reconhecidos pela maioria sujeitos. A única exceção foi o mito 3, o qual obteve o maior índice de reconhecimento, sendo identificado por cinco sujeitos (38,5%). Os demais mitos foram reconhecidos somente por um sujeito (7,7%).

Em síntese, podemos afirmar que os momentos de História e Filosofia da Ciência durante a aplicação da unidade de ensino contribuiu para que 38,5% percebessem que o modelo corpuscular de Einstein (1905) era uma ideia rival à hipótese de disparo de Philip Lenard (1902), esta última apoiada pelo modelo ondulatório e amplamente aceita pela comunidade científica na época. Como exemplo, citamos as respostas do sujeito A10 para três itens da questão 06: “1. *Nem tanto, Einstein usou alguns princípios de Planck, como a constante (h)*; 2. *Não, tanto Einstein como Lenard explicavam os mesmos fatos de formas diferentes*; 3. *Lenard explicou os resultados experimentos pela sua hipótese de disparo*”. Percebemos pelas afirmações que ele recorda que tanto Einstein como Lenard explicavam os mesmos fatos experimentais, porém, com ideias totalmente diferentes. Ou seja, estas respostas sinalizam que este sujeito apresenta uma visão de construção do conhecimento científico permeada pelo debate de ideias, no qual não é apenas valorizada evidências experimentais, mas também sua respectiva interpretação.

De acordo com a TBR, era esperado um número muito maior de repostas corretas, pois novamente estamos diante de uma tarefa em que o sujeito deva recordar conhecimentos factuais no nível processo cognitivo lembrar. Entretanto, os resultados indicam que, mesmo para uma questão considerada menos exigente cognitivamente pela TBR, menos da metade dos sujeitos tiveram facilidade em acertá-la (38,5%).

Considerando os resultados e análise apresentados nesse capítulo, concluímos que nossa avaliação final de conhecimento e as atividades propostas poderiam ser modificadas de modo a oferecer mais oportunidades de se investigar o processo de aprendizagem. O ideal seria que houvesse três questões para cada novo conceito físico investigado, de tal forma que em cada conceito fosse investigado nos níveis de processos cognitivos lembrar, entender e aplicar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nosso trabalho buscou contribuir para o preenchimento de uma lacuna identificada na linha pesquisa Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio: a escassez de trabalhos que investigam efetivamente a construção de conceitos físicos de FMC pelos os alunos em situações reais de ensino (OSTERMANN e PEREIRA, 2009; SILVA e ALMEIDA, 2011).

Dentre as possibilidades de conteúdo a serem escolhidos para nossa investigação, optamos pelo ensino do experimento do Efeito Fotoelétrico, pois esse tópico permite apresentar aos alunos os primeiros conceitos de Física Quântica, em especial: a quantização da energia e a dualidade onda-partícula.

Buscando identificar as diferentes propostas de ensino e resultados de aprendizagem descritos na literatura, bem como as principais dificuldades com relação ao ensino do Efeito Fotoelétrico, fizemos um levantamento sobre o ensino do Efeito Fotoelétrico. Identificamos 41 artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais no período de 1987 a 2014. A distribuição do número de trabalhos de acordo com o enfoque dado pelo autor, permitiu inferir que a maioria deles relatam propostas a serem utilizadas em sala de aula mediante utilização de simulação computacional, experimentação ou História da Ciência.

Por outro lado, também evidenciamos que somente 11 dos trabalhos relatavam propostas metodológicas testadas em situações reais de ensino, com apresentação de respectivos resultados de aprendizagem. Nossa constatação reforça os apontamentos de Ostermann e Moreira (2000), Greca e Moreira (2001), Ostermann e Pereira (2009) e Silva e Almeida (2011), quando afirmam que na literatura há muitas propostas metodológicas para o ensino de diversos tópicos de FMC, no entanto, poucos pesquisadores efetivamente as avaliaram em uma situação de sala de aula.

Considerando esses resultados, nossa proposta consistiu em desenvolver e aplicar uma unidade de ensino buscando investigar possíveis contribuições para a aprendizagem significativa dos conceitos físicos presentes no experimento do Efeito Fotoelétrico.

Nossa unidade de ensino tomou como ponto de partida o trabalho elaborado por Cardoso e Dickman (2012), cujo objetivo era investigar as contribuições do uso de simulações computacionais para aprendizagem significativa do Efeito Fotoelétrico, tendo como sujeitos alunos de nível médio. Em suas considerações, os autores sugeriram os seguintes

encaminhamentos para futuras investigações: adição de atividades sobre operações matemáticas envolvendo números com potência de dez; alterações na avaliação final de conhecimento; utilização de novas ferramentas de ensino que possibilitem dar maior ênfase na diferenciação dos conceitos de intensidade e frequência de luz, na relação entre número de fotoelétrons ejetados e número de fôtons do feixe de luz, bem como na relação entre frequência e o comprimento de onda com a energia de cada fóton.

Dos problemas relacionados ao ensino do Efeito Fotoelétrico apontados por Cardoso e Dickman (2012), principalmente com relação à utilização de novas ferramentas de ensino, identificamos em nossa pesquisa bibliográfica três trabalhos internacionais (KRAGH, 1992; KLASSEN, 2009 e NIAZ et al, 2010) que relatavam como possíveis alternativas de soluções o emprego de aspectos de História e Filosofia da Ciência (HFC), associados à relutância da comunidade científica, durante quase duas décadas, em aceitar a ideia revolucionária de “quantum de luz”.

Niaz et al (2010), por exemplo, consideram que a História da Ciência, quando integrada adequadamente com um método de instrução que inclui demonstrações experimentais, ilustrações, questionários e exemplo de situações nas quais são aplicados os novos conceitos, pode proporcionar ganhos significativos de aprendizagem em relação as aulas unicamente expositivas.

Com base nos resultados destes trabalhos, materializou-se a nossa unidade de ensino potencialmente significativa, objeto dessa dissertação. Nela, buscamos promover as modificações sugeridas por Cardoso e Dickman (2012) com uma sinergia entre aspectos de HFC e uso de simulação computacional.

Para avaliar o processo, elaboramos instrumentos de coleta de dados que possibilitassem inferir sobre a aprendizagem significativa os novos conceitos físicos presentes no experimento do Efeito Fotoelétrico.

O processo como um todo buscou responder a seguinte questão de pesquisa: Quais as contribuições de uma unidade de ensino potencialmente significativa mediada pelo uso de simulação computacional e HFC, para aprendizagem significativa do Efeito Fotoelétrico pelos alunos do 6º Período do Curso de Educação Profissional Técnica de Nível Médio Integrado em Edificações do Instituto Federal do Mato Grosso do Sul - IFMS, Campus Aquidauana?

Para responder esta questão fez-se necessário a elaboração de dois produtos educacionais: um texto sobre a abordagem histórica do Efeito Fotoelétrico e a unidade de ensino

mediada por esse texto e uma simulação computacional. No primeiro produto, o relato sobre o desenvolvimento histórico dos diversos modelos propostos para natureza da luz, apresentado no capítulo 3 dessa dissertação, detalhamos cronologicamente os modelos, desde os tempos da Grécia Antiga até os dias atuais, incluindo a Teoria Quântica de Campos – TQC.

Em uma seção específica deste relato, descrevemos a história do efeito fotoelétrico por meio de seis episódios: a) A descoberta do Efeito Fotoelétrico por Hertz; b) A hipótese de disparo de Lenard para explicar o Efeito Fotoelétrico; c) A hipótese rival de quantum de luz de Einstein para explicar o Efeito Fotoelétrico; d) O período de rejeição da comunidade científica a ideia de quantum de luz; e) A verificação experimental de Millikan da equação de Einstein do Efeito Fotoelétrico apesar de não aceitar a ideia de quantum de luz de Einstein e g) A descrição do Efeito Compton utilizando o conceito de quantum de radiação eletromagnética para decisiva aceitação da ideia revolucionária de Einstein (KRAGH, 1992; KLASSEN, 2009; NIAZ ET AL, 2010).

O segundo produto foi a elaboração de uma unidade de ensino potencialmente significativa, cujo tempo estimado para o seu desenvolvimento foi de 12 aulas de 45 minutos cada, incluindo as verificações de conceitos prévios e de aprendizagem dos novos conteúdos. Nela exploramos os novos conceitos a partir de leitura de textos, descrição de dispositivos tecnológicos, vídeos, roteiro de atividades para utilização da simulação computacional, aspectos de HFC, resolução de exercícios e mapa conceitual.

A estruturação desta unidade está fundamentada na apresentação sequencial dos episódios da história do Efeito Fotoelétrico e nos princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS) de David Ausubel (2003).

A TAS possibilitou conhecer e interpretar de forma mais ampla como se dá ou não o processo de aprendizagem na estrutura cognitiva dos sujeitos. Logo, ela forneceu as diretrizes para a elaboração de um material potencialmente significativo, o qual levou em consideração os princípios da organização sequencial da apresentação das novas informações, da diferenciação progressiva, da diferenciação integrativa e da consolidação. Todos estes princípios serviram de embasamento teórico para tomada de decisões em relação ao momento mais adequado das diferentes ferramentas de ensino utilizadas na aplicação da unidade de ensino.

A unidade de ensino, estruturada a partir da História da Ciência e da TAS, foi dividida nas seguintes etapas:

1. Verificação da presença dos subsunçores para introdução do novo conteúdo;
2. Possível atividade de ensino para construção de subsunçores;
3. Os modelos propostos para natureza da luz até a Era Pré-Física Quântica;
4. A descoberta, descrição, as previsões da Física Clássica e as evidências experimentais encontradas no Efeito Fotoelétrico;
5. Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Primeira Parte;
6. A hipótese de disparo de Lenard para explicar o Efeito Fotoelétrico;
7. A descrição do modelo corpuscular de Albert Einstein para a luz como hipótese rival à hipótese de disparo de Lenard;
8. Utilização de simulação computacional com roteiro de estudo – Segunda Parte;
9. Resolução de exercícios, utilização do mapa conceitual e a rejeição da comunidade científica às ideias de Einstein.
10. Descrição do Efeito Compton (1921) como fator decisivo para a aceitação pela comunidade científica das ideias de Einstein e descrição do Princípio da Complementariedade de Bohr (1928);
11. Verificação de aprendizagem.

Especificamente com relação ao uso de uma abordagem histórica no ensino do Efeito Fotoelétrico durante a aplicação de nossa unidade de ensino, foi dada ênfase à exclusão de distorções histórico-epistemológicas presentes nos livros didáticos, tais como: narrativas linearizadas; relatos romantizados; desprezo do erro; interpretação única das evidências experimentais e aceitação imediata de novas ideias perante comprovação experimental (FORATO, 2009).

Com base em nossas percepções como professor, destacamos três aspectos positivos bem evidentes, que já foram amplamente divulgados na literatura (MATHEW, 1992; BRASIL, 2002; HÖTTECKE, 2011; SAMBA E RICARDO, 2014) com relação à utilização da abordagem histórica de um conteúdo. Em primeiro lugar, a HFC possibilitou uma descrição humanística da revolução científica ocorrida no início do século XX, evidenciando a coexistência de explicações divergentes para as mesmas evidências experimentais no Efeito Fotoelétrico, numa mesma época. Buscamos enfatizar os conflitos entre as teorias e competição entre os vários grupos de cientistas, demonstrando, assim, que as explicações científicas podem

ser ao mesmo tempo questionáveis, instáveis, passíveis de transformações e, por fim, dificilmente abandonadas.

Buscando identificar o real efeito de nossa abordagem na própria aprendizagem da história do Efeito Fotoelétrico pelos sujeitos da pesquisa, utilizamos como uma questão de avaliação final de conhecimento (Q. 06), quatro distorções históricas (mitos) sobre o Efeito Fotoelétrico, geralmente presentes nos livros didáticos de física, apontadas por Klassen (2009): 1) Einstein apenas aplicou o trabalho de Planck de 1900; 2) A teoria de Einstein explicava fatos inexplicáveis pela teoria eletromagnética; 3) Os resultados experimentais do Efeito Fotoelétrico são inexplicáveis sem a hipótese de fótons e 4) Millikan fez a verificação final da teoria de Einstein e após isto, ela foi amplamente aceita.

Nossos resultados sinalizaram que o mito 3 obteve o maior índice de reconhecimento, sendo identificado por cinco sujeitos da pesquisa (38,5%). Os demais mitos foram reconhecidos somente por um sujeito (7,7%). Ou seja, podemos afirmar que os momentos expositivos de HFC durante a aplicação da unidade de ensino contribuíram para que somente 38,5% percebessem que o modelo corpuscular de Einstein (1905) era uma ideia rival à hipótese de disparo de Philip Lenard (1902), esta última apoiada pelo modelo ondulatório e amplamente aceita pela comunidade científica na época.

Um segundo aspecto associado à nossa utilização da HFC foi a possibilidade de fornecer aos alunos uma imagem contextualizada de construção dos primeiros conceitos de Física Quântica. Por exemplo, foi possível explorar a relação entre a ciência e tecnologia nos sistemas de acionamento por feixes de luz, tais como: controles remotos; sensores de presença e a descrição do funcionamento do sistema de iluminação pública. A relação entre ciência e filosofia foi discutida nos momentos expositivos descrevendo a rejeição da comunidade científica para interpretação dual da natureza da luz. Já a relação entre ciência e ambiente foi explorada na aplicação do Efeito Fotoelétrico como princípio de funcionamento das células fotovoltaicas como alternativa energética atual. Portanto, os momentos de contextualização por meio da HFC possibilitaram apresentar a importância da aprendizagem do Efeito Fotoelétrico por meio de sua presença em vários momentos da rotina dos sujeitos da pesquisa.

O terceiro e último aspecto, resultante de nossas observações, é a reafirmação do potencial motivacional dessa abordagem para atrair a curiosidade dos alunos durante as aulas, possibilitando uma visão menos matemática do ensino de física e ao mesmo tempo promovendo a tão atualmente aclamada alfabetização científica.

Tomando como referência as dez grandes categorias temáticas apontadas por Samba e Ricardo (2014), as quais sintetizam os argumentos de defesa da inserção de aspectos de HFC no ensino de ciências presentes na literatura, nossas constatações anteriores podem ser enquadradas em cinco categorias, a saber: contextualização interna; contextualização externa; falibilidade epistêmica; socialização epistêmica e motivacional.

Apesar de reconhecermos, valorizarmos e recomendarmos a utilização desta abordagem em sala de aula, devemos sinalizar que o relato completo da história do Efeito Fotoelétrico pode trazer também algumas dificuldades para o ensino de novos conceitos de Física Quântica. Estas dificuldades referem-se à aprendizagem das características dos modelos clássicos e quânticos para os mesmos conceitos físicos, pois o aluno agora terá a tarefa de lembrar, entender e aplicar propriedades clássicas e quânticas ao mesmo tempo, porém, estas são totalmente diferentes e divergentes, resultando muitas vezes em maior confusão conceitual.

Nossos resultados apontaram que nossos sujeitos apresentaram consideráveis dificuldades para estabelecer limites de validade para um conceito físico, em especial, para os conceitos de intensidade e frequência de luz. Em outras palavras, a compreensão de que a energia transportada por uma onda eletromagnética depende ora somente da sua intensidade (eletromagnetismo clássico) e ora somente de sua frequência da onda (fenômenos quânticos), mostrou-se uma tarefa extremamente complexa para os sujeitos da pesquisa.

Sugerimos que, caso o professor decida utilizar uma abordagem história do experimento do Efeito Fotoelétrico, dê ênfase e atenção a possibilidade de falta de clareza, para os alunos, no estabelecimento dos limites de validade dos conceitos físicos (definições clássicas ou quânticas). Apesar da existência desta dificuldade, acreditamos que o não uso desta abordagem traz um número maior de aspectos negativos, pois a apresentação somente dos aspectos quânticos dos conceitos levaria a um ensino descontextualizado, tornando praticamente impossível a percepção do quão revolucionária foi a hipótese de “quantum de luz” proposta por Einstein em 1905. Assim, o que podemos ressaltar é a real importância que o professor deverá dispensar com as definições conceituais e, principalmente, com os limites de validade destas definições.

Com relação à nossa utilização da simulação computacional, apesar de não termos utilizado um instrumento específicos de avaliação motivacional, com base no interesse demonstrado pelos sujeitos da pesquisa durante a execução dos roteiros de atividades,

reafirmamos as contribuições motivacionais já apontados por Machado e Nardi (2006), McKagan et al (2009) e Cardoso e Dickman (2012).

Durante a utilização da simulação computacional percebemos o engajamento dos sujeitos na ação, buscando a compreensão do fenômeno, demonstrando persistência na elaboração das respostas às perguntas do roteiro de atividades e muitos questionamentos. Tais aspectos corroboram as potencialidades do uso de tal ferramenta citadas por Cardoso e Dickman (2012), tais como: a testagem de hipóteses; a obtenção de uma postura mais participativa dos alunos; a observação em outra perspectiva de um fenômeno abstrato.

Utilizamos a simulação computacional em momentos pós aula expositiva buscando a aplicação dos princípios da TAS: diferenciação progressiva, reconciliação integrativa, organização sequencial e consolidação. A utilização da primeira parte do roteiro de atividades permitiu que os sujeitos reconhecessem as primeiras observações experimentais no experimento do Efeito Fotoelétrico, enquanto que na segunda foi possível aplicar o modelo corpuscular da luz para explicar outras evidências experimentais.

Consideramos que as atividades com a simulação computacional contribuíram para uma reorganização dos conceitos na estrutura cognitiva dos sujeitos (processo assimilação de novos conceitos), possibilitando que os novos conceitos se relacionassem de maneira não-substantiva e não-arbitrária com os subsunçores existentes.

Entretanto, precisamos chamar a atenção para uma situação muito importante com relação à utilização da simulação computacional: o fato de que para certos comprimentos de onda podemos visualizar muitos fotoelétrons sendo emitidos da placa metálica, porém o amperímetro não registra nenhum valor de corrente elétrica. Isto foi apontado por alguns sujeitos da pesquisa durante a execução da primeira parte do roteiro de atividades, necessitando da intervenção do pesquisador, que optou por afirmar a eles para se aterem ao aspecto visual de movimentação dos fotoelétrons e não ao valor indicado no amperímetro, visto que neste momento o importante era que os sujeitos identificassem que havia um comprimento de onda máximo para a ocorrência do Efeito Fotoelétrico.

Também identificamos outro aspecto potencialmente prejudicial à utilização da simulação computacional, pois observamos que alterações no comprimento de onda interferem na quantidade de fotoelétrons emitidos da placa metálica. Isto acontece porque os fotoelétrons não apresentam um valor único de função trabalho para o mesmo metal, assim, fótons mais energéticos são mais propensos a liberar fotoelétrons, pois uma proporção maior dos

fotoelétrons no metal tem energia de ligação menor do que a energia dos fótons. Logo, à medida que aumenta a frequência, o número de fotoelétrons emitidos (e, portanto, a corrente elétrica) irá aumentar até que todos os fótons estejam emitindo fotoelétrons.

Em outras palavras, o que queremos destacar aqui é que o modelo físico que pressupõe à elaboração desta simulação computacional e o modelo físico presente no livro didático²⁵ utilizado por nós em sala de aula, aprovado pelo Plano Nacional do Livro Didático, são contraditórios para esta situação, pois neste livro é afirmado que a corrente elétrica deve permanecer constante acima da frequência de corte. Esta contradição conceitual também foi identificada quando consultamos três livros de física de ensino superior frequentemente utilizados por nós para o planejamento das aulas. Além disso, destacamos que não há nenhuma maneira de evitar na simulação que a corrente elétrica aumente com o aumento da frequência.

Nesse sentido, sugerimos ao professor que opte por utilizar esta simulação computacional, que esteja atento a estas duas situações contraditórias, a fim de minimizar os efeitos destas na aprendizagem dos novos conceitos.

Para avaliar a contribuição da aplicação de nossa unidade de ensino para a aprendizagem significativa dos novos conceitos físicos presentes no experimento do Efeito Fotoelétrico, nossa análise tomou como dados as respostas dos sujeitos às questões da avaliação de diagnóstico inicial e a avaliação final de conhecimento.

Considerando que TAS pressupõe a definição de conhecimentos prévios relevantes (subsunçores) necessários para introdução dos novos conceitos, inferimos que para o Efeito Fotoelétrico eles seriam: (a) O modelo atômico de Bohr-Rutherford; (b) Ondas eletromagnéticas; Operações matemáticas e sistema internacional de unidades de unidades e (d) Lei da conservação da energia. Assim, buscamos na avaliação de diagnóstico inicial investigar a estrutura cognitiva dos sujeitos e classificar seus subsunçores como presente (SP), mal definido (SMD) ou ausente (SA). Tais categorias foram obtidas a partir do trabalho de Cardoso e Dickman (2011).

Nossa análise apontou que os maiores percentuais das respostas foram classificados como subsunçores ausentes (SA). Este fato ocorre principalmente nas questões que abordavam os subsunçores Estrutura da Matéria e Ondas Eletromagnéticas, explorados nas questões Q01 a

²⁵ SANT'ANNA, B.; REIS, H. C.; MARTINI, G.; SPINELLI, W. **Conexões com a Física** – Volume 03 – Capítulo 18 - 1ª Edição – Ed. Moderna, 2010. p. 370.

Q09. Tal resultado, sinaliza segundo nosso entendimento que estes conceitos já passaram pela fase de assimilação obliteradora.

Nas questões que envolviam o sistema internacional de unidades, possíveis conversões de unidades e aplicação de fórmulas para resolução de exercícios (Q10, Q11, Q12 e Q15b), o número de sujeitos com subsunçores ausentes foi relativamente mais baixo. Nossos resultados são similares aos encontrados por Gomes (2011) e Silva e Almeida (2011), neste sentido, concordamos com os autores quando afirmam que isto provavelmente é uma consequência da constante utilização de fórmulas, gráficos e transformações de unidades de medidas na disciplina de física durante todo ensino médio.

Na avaliação final investigamos a existência de indícios de aprendizagem significativa dos novos conceitos físicos estudados, a saber: 1) Dualidade onda-partícula para luz; 2) Função trabalho de uma superfície metálica; 3) Energia de um fóton; 4) Aplicação da lei da conservação da energia no experimento do Efeito Fotoelétrico; 5) Intensidade e frequência de luz de acordo com o modelo corpuscular; 6) Energia cinética do fotoelétron e 7) Fóton.

Em nossa análise estes conceitos foram classificados como conceito suficiente (CS), conceito insuficiente (CI) e conceito ausente (CA). Tais categorias foram obtidas a partir do trabalho de Cardoso e Dickman (2011).

A análise dos dados da avaliação final de conhecimento, evidenciou que somente para os conceitos de função trabalho, energia de um fóton e energia cinética dos fotoelétrons, os sujeitos apresentaram um número razoavelmente maior de indícios de aprendizagem significativa. Para uma possível compreensão deste resultado, devemos perceber que estes três novos conceitos se referem a um conceito prévio mais geral e inclusivo: o conceito de energia. Ele, algumas vezes, é apresentado aos alunos já no ensino fundamental e depois continua sendo utilizado recursivamente ao longo de todo ensino médio, não apenas na disciplina de física, mas também em biologia, química, geografia e sociologia.

Assim, como o experimento do efeito fotoelétrico fornece outra nova situação física para utilização do conceito de energia, entendemos que ele passou pelos processos de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa sem muitas dificuldades (aprendizagem por assimilação), o que justifica a presença de um maior número de indícios de aprendizagem significativa.

Por outro lado, os conceitos de dualidade onda-partícula, intensidade de luz, frequência de luz e fóton foram os que menos apresentaram indícios de aprendizagem significativa.

Entendemos que este resultado esteja relacionado ao primeiro contato dos sujeitos com estes conceitos de Física Quântica. É possível inferir que os conceitos de intensidade de luz e frequência já eram familiares aos sujeitos, uma vez que os mesmos foram estudados na disciplina de Física 4, cerca de um ano antes da aplicação da unidade de ensino, no entanto, as definições quânticas destes conceitos são totalmente contrárias às suas definições clássicas, tornando-os relativamente novos aos sujeitos da pesquisa.

De acordo com a TAS, a dificuldade de integração destes novos conceitos físicos à estrutura cognitiva está relacionada, além do elevado grau de abstração destes conceitos, à ausência de subsunçores específicos para a sua ancoragem, visto que provavelmente os sujeitos não tiveram contato anteriormente com o conceito de dualidade de fenômenos físicos e das propriedades das partículas de energia.

Diante disso, consideramos que uma possível alternativa para minimizar essa dificuldade seria a alteração na distribuição do tempo de apresentação destes conceitos nos planos de aula: com um intervalo maior de exposição em sala de aula seria possível explorar com mais profundidade detalhes os fenômenos ondulatórios e corpusculares para a luz.

Com relação aos conceitos de intensidade e frequência de luz, explorados nas questões Q05.2 e Q05.3, na qual obtivemos um percentual de respostas classificadas como conceito suficiente (CS) igual a 23%, consideramos que à evidente falta de clareza destes conceitos poderá ser minimizada com a utilização de um experimento demonstrativo do Efeito Fotoelétrico em eletroscópios. Esse experimento deverá possibilitar a manipulação da intensidade e o tipo de luz incidente.

Por fim, para minimizar as dificuldades na aprendizagem do conceito de fótons, acreditamos que uma alternativa para apresentar de forma mais clara suas características, enfatizando não apenas a relação energia e frequência de luz, seria a utilização de texto escritos²⁶ sobre partículas mediadores de forças, de preferência, na última aula da unidade de ensino.

Os resultados obtidos nessa avaliação final de conhecimento sinalizam como resposta para questão de pesquisa²⁷ que nossa unidade de ensino não contribuiu para a aprendizagem

²⁶ Sugestão de texto: MOREIRA, M.A. **Partículas e Interações**, Física na Escola, v.5, n.2, pag. 10-14. 2004.

²⁷ Quais as contribuições de uma unidade de ensino potencialmente significativa mediada pelo uso de simulação computacional e HFC, para aprendizagem significativa do Efeito Fotoelétrico pelos alunos do 6º Período do

significativa, apesar de seguirmos as orientações da TAS, na sua elaboração. Constatamos que a maioria dos sujeitos tiveram dificuldades em aprender significativamente os novos conceitos físicos.

Isso nos levou a refletir sobre a estrutura e os tipos de questões presentes na avaliação final de conhecimento e o grau da aprendizagem significativa, a partir dos seis tipos de processos cognitivos da Taxonomia de Bloom Revisada (TBR).

Identificamos que nossas questões privilegiaram o Conhecimento Conceitual (70% das questões) em comparação com o Conhecimento Factual (30% das questões). No primeiro, estão envolvidos os conhecimentos de classificação e categorização, de princípios e generalizações e de teorias, modelos e estruturas. No segundo, tem-se conhecimentos da terminologia, de detalhes e elementos específicos.

Com relação à Dimensão Processos Cognitivos, evidenciamos que as questões privilegiaram o processo cognitivo LEMBRAR (60% das questões), seguido por ENTENDER (40% das questões) e, APLICAR (20% das questões). O primeiro processo está relacionado a simplesmente reconhecer e/ou reproduzir ideias e conteúdos. Requer distinguir e selecionar uma determinada informação e reproduzir ou recordar. O segundo está associado à interpretação, a inferência e a comparação de informações. Nele, espera-se que o sujeito seja capaz de estabelecer uma conexão entre os novos conceitos com outros, já previamente adquiridos, construindo o significado dos novos conceitos. E, por fim, o terceiro, está relacionado a executar ou usar um procedimento numa situação específica e pode também abordar a aplicação de um conhecimento numa situação nova.

Para os conceitos de função trabalho, intensidade de luz e frequência de luz, energia cinética dos fotoelétrons emitidos, visto que estes conceitos foram investigados em questões com processos cognitivos diferentes, foi possível inferir que para questões envolvendo o nível imediatamente acima, o desempenho dos sujeitos é menor do que nas questões envolvendo o nível anterior. Ressaltamos que esse entendimento não é consenso na literatura: alguns autores pontuam que isso não seja uma regra absoluta (MAYER, 2002; FERRAZ e BELHOT, 2010).

Entretanto, nossos resultados indicaram que em questões como Q01, Q02, Q03, Q05.4 e Q06, nas quais eram exigidos somente conhecimentos factuais ou conceituais, no nível

processo cognitivo “lembrar”, os sujeitos da pesquisa tiveram dificuldades para elaborar respostas consideradas corretas.

Tais reflexões sobre a estrutura das questões da avaliação final de conhecimento, fundamentada nos princípios da Taxonomia Revisada de Bloom, poderia resultar em indícios mais precisos sobre a aprendizagem dos novos conceitos físicos.

Essas reflexões oriundas das considerações finais de nosso projeto de mestrado serviram de diretrizes para modificações e adaptações da nossa unidade de ensino potencialmente significativa. Em uma futura aplicação no contexto de sala de aula, no final deste ano, vamos reavaliar nossa unidade de ensino, entretanto, a aplicação essa que não foi possível de se realizar nesse trabalho, pois no primeiro semestre de 2015 não haveria tempo suficiente para análise dos dados já construídos, aplicação de outra unidade de ensino, nova análise de dados e conclusão do trabalho até o prazo estipulado pelo programa de Pós-Graduação.

Assim, entendemos que, neste momento, seria interessante disponibilizar a comunidade a unidade de ensino originalmente aplicada nessa pesquisa e sua reformulação como produto desta dissertação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMANY, F. S.; BLANCO, J. L. D.; TORREGROSA, J. M. *La introducción del concepto de fotón en bachillerato*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2. Abr. 2013.
- ALVES, E. G.; SILVA, A. F. *Usando um LED como fonte de energia*. A Física na Escola, v. 9, n. 1, 2008.
- ARAGAO, R. M. R. *Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel: Sistematização dos Aspectos Teóricos Fundamentais*. Tese (Doutorado em Educação) Faculdade de Educação da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas. 1976.
- ARAUJO, I. S.; VEIT, E. A.; MOREIRA, M. A. *Uma revisão da literatura sobre estudos relativos a tecnologias computacionais no ensino de física*. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/alexbc/materiais/UMA_REVISAO_DA_LITERATURA SOBRE ESTUDOS RELATIVOS A TECNOLOGIAS Moreira_IIEIBIEC.pdf> Acessado em 25 de setembro de 2014.
- ARAÚJO, W. S.; RODRIGUES, C. G. *Comparando ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 360-365, set. 2001.
- AUSUBEL, D. *Aquisição e retenção de conhecimentos: Uma perspectiva cognitiva*. Tradução: Lígia Teopisto, 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana. 2003, 242 p
- AUSUBEL, D. P.; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Educational psychology: a cognitive view*. 2ª Ed. Nova York, Holt Rinehart and Winston, 1978.
- BANCO INTERNACIONAL DE OBJETOS EDUCACIONAIS. Disponível em: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/38/browse?type=title>> Acesso em 25 de setembro de 2014.
- BARTHEM, Richard. *A Luz*. São Paulo: Editora Livraria da Física – Sociedade Brasileira de Física, 2005.
- BLOOM, B. S. et al. *Taxonomy of educational objectives*. New York: David Mckay, 262 p. 1956.
- BOHR, N. (1922). *The structure of the atom. Nobel lecture*, 11 de Dezembro, 1922. Disponível em: <http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html>. Acessado em 27 de setembro de 2014.
- BRASIL, Ministério da Educação e Cultura – Secretaria de Educação Médica e Tecnológica. *Linguagens, códigos e suas tecnologias: orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais – PCN+*. Brasília: MEC, 2002.
- BRASIL. Ministério da Educação e Cultura - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul – IFMS. *Projeto do curso de educação profissional técnica de nível médio integrado em edificações - PPC*. Aquidauana. 2012.
- BRASIL. Senado Federal. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*. Lei nº 9394/96. Brasília. 1996.
- BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. *Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna*. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, dez. 2005.
- CARDOSO, L. N. *A utilização do software educacional de simulação e modelagem “Interactive Physics” como instrumento de promoção da aprendizagem significativa de*

conceitos de Física: uma investigação pedagógica a partir da proposição de situações-problema. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação – PPGCP, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003. 111 p.

CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. *Ensinando o Efeito Fotoelétrico por meio de Simulações Computacionais: Roteiro de aula de acordo com Teoria da Aprendizagem Significativa*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática – PPECM, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011. 118 p.

CARDOSO, S. O. O.; DICKMAN, A. G. *Simulação computacional aliada à teoria da aprendizagem significativa: uma ferramenta para o ensino e aprendizagem do Efeito Fotoelétrico*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 29, n. Especial 2: p. 891-934, out. 2012.

CARUSO F; FREITAS N. *Física Moderna no Ensino Médio: O Espaço-Tempo de Einstein em Tirinhas*. Caderno Brasileiro em Ensino de Física, v. 26, n. 2: p. 355-366, ago. 2009.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. *Uma oficina de Física Moderna que visa sua inserção no ensino médio*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 263-276, dez. 2001

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; SOUZA, D. F.; MUZINATTI, J. *Uma Aula sobre o Efeito Fotoelétrico no Desenvolvimento de Competências e Habilidades*. A Física na Escola, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 24-29, maio 2002.

CLEMENT, L.; TERRAZAN, E. A. *Atividades Didáticas de Resolução de Problemas e o Ensino de Conteúdos Procedimentais*. Revista Electrónica de Investigación em Educación em Ciencias – REIEC, vol. 6, n. 1, p. 87-101. 2011.

COELHO, G. R.; BORGES, O. *O entendimento dos estudantes sobre a natureza da luz em um currículo recursivo*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. 1: p. 63-87, abr. 2010.

DANTE, L. R. *Criatividade e resolução de problemas na prática educativa matemática*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Tese de Livre Docência, 1988.

DE LEONE, C. J; OBEREM, G. E. *Physics Education Research Conference Proceedings*. American Institute of Physics, Melville, New York, 2003.

DIONÍSIO, P. H. *Albert einstein e a física quântica*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 22, n. 2: p. 147-164, Ago. 2005.

DOMINGUINI, L. *Física moderna no Ensino Médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 2, jan-abril. 2012.

EINSTEIN, A. *Concerning na heuristic point of view toward the emission and transformation of light*. American Journal of Physics, v. 33, n. 5, 1–16.

ESPÍNDOLA, A. L.; MARTINS, A. M. C.; FETTUCCIA, M. R. C. *Manual do Aluno: Fotoeletricidade*. Disponível em: <<http://paje.fe.usp.br/~mef-pietro/mef2/app.upload/81/ManualdoAluno.pdf>>. Acessado em 26 de setembro de 2014.

FERRAZ, A. P. C. M; BELHOT, R. V. *Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais*. Gest. Prod [on line]. São Carlos, n. 2, p.421-431, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2010000200015>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2015.

- FIOLHAIS, C.; TRINDADE, J. *Física no computador: O computador como uma ferramenta no ensino e na aprendizagem das Ciências Físicas*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, n. 3, p. 259-272, set. 2003.
- FORATO, T. C. M. *A Natureza da Ciência como Saber Escolar: um estudo de caso a partir da história da luz*. Tese (Doutorado em Educação) Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo - USP, São Paulo. 2009.
- GALILI, I. *Excursion to the history of image concept and vision: From pythagoras to kepler*. Disponível em: http://hipst.eled.auth.gr/hipst_docs/Image_Igal.pdf. Acessado em 01/04/2015. Acessado em 04 de julho de 2015
- GOMES, V. D. *O uso de simulações computacionais no ensino do efeito fotoelétrico*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Educação Matemática) – Programa de Pós-Graduação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba – PPGECM. Campina Grande, 2011. 111p.
- HECKLER, V.; SARAIVA, M. F. O.; FILHO, K. S. O. *Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 2, p. 267-273. 2007.
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. 9ª Edição – Ed. Bookman, 2007.
- HOBSON, A. *Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses*. 2005. Disponível em: <<http://physics.uark.edu/hobson/pubs/05.03.AJP.pdf>>. Acessado em 05/02/2015.
- HOBSON, A. *There are no particles, there are only fields*. 2013. Disponível em: <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.4616.pdf>>. Acessado em 05/02/2015.
- HÖTTECKE, D.; HENKE, A.; RIESS, F.; SILVA, C. *Why Implementing History and Philosophy in School Science Education is a Challenge: an analysis of obstacles*. Science & Education, Dordrecht, v. 20, n. 3-4, p. 293-316, mar. 2011.
- JARDIM, W, T.; GUERRA, A.; CHRISPINO, A. *Revisão de bibliografia: física moderna e sua relevância no ensino médio*. XIX Simpósio Nacional de Ensino de Física (XIX SNEF), Manaus, fev. 2011.
- JONES, D. G. C. *Teaching modern physics -microconceptions of the photon that can damage understanding*. Physics Education, v. 26, n. 2, p. 93-98, Mar. 1991.
- KLASSEN S. *The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom*. Science & Education, v. 20, p. 719-731, nov. 2009.
- KLASSEN, S.; NIAZ, M.; METZ, D.; McMILLAN, B.; DIETRICH, S. *Portrayal of the History of the Photoelectric Effect in Laboratory Instructions*. Science & Education, v. 21, p. 729-743. May. 2011.
- KÖHNLEIN J, F, K; PEDUZZI L, O, Q. *Uma Discussão Sobre a Natureza da Ciência no Ensino Médio: um Exemplo com a Teoria da Relatividade Restrita*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 22, n. 1: p. 36-70, abr. 2005.
- KOVAČEVIĆ, M. S.; DJORDJEVIĆ, A. *A mechanical analogy for the photoelectric effect*. Physics Education, v. 41, n. 6, p. 551-555, Nov. 2006.
- KRAGH, H. *A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory*. Science & Education, v. 1, p. 349–363. 1992.

- KRATHWOHL, D. R. *A revision of Bloom's taxonomy: an overview*. Theory in Practice, v. 41, n. 4, p. 212-218, 2002.
- LOCH, J.; GARCIA, N. M. D. *Física moderna e contemporânea na sala de aula do ensino médio*. VII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (VII ENPEC), Florianópolis, nov. 2009.
- MACEDO, J. A. *Simulações computacionais como ferramenta auxiliar ao ensino de conceitos básicos de eletromagnetismo: elaboração de um roteiro de atividades para professores do ensino médio*. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. 137 p.
- MANGILI, A. I. *Heinrich Rudolph Hertz e a “descoberta” do efeito fotoelétrico: Um exemplo dos cuidados que devemos ter ao utilizar a história da ciência na sala de aula*. História da Ciência e Ensino: Construindo Interfaces, v. 6, 2012 – pp. 32-48.
- MARTINS, A. F. P. *História e filosofia da ciência no ensino: Há muitas pedras nesse caminho*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 24, n. 1: p. 112-131, abr. 2007.
- MATTHEWS, M. R. *History, Philosophy and Science Teaching: the present rapprochement*. Science & Education, Dordrecht, v. 1, n. 1, p. 11-47, 1992.
- MAYER, R. E. *Role versus Meaningful Learning*. Theory in Practice, v. 41, n. 4, p. 226-232, 2002.
- McKAGAN, S. B.; HANDLEY, W.; WIEMAN, C. E. *A Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect*. American Journal of Physics, v. 77, p. 87-94. Jun, 2009.
- MEDEIROS, A. *Dos mistérios da Física Clássica ao nascimento da Teoria Quântica*. A Física na Escola, v. 6, n. 1, 2005.
- MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. *Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da Física*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.
- MILLIKAN, R. *The electron and the light-quant from the experimental point of view* (Nobel Prize acceptance speech delivered on May 23, 1924). Nobel lectures (pp. 54-66). Amsterdam: Elsevier. 1965.
- MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; FILHO, J. B. B. *A sistemática incompreensão da teoria quântica e as dificuldades dos professores na introdução da física moderna e contemporânea no ensino médio*. Ciência & Educação, v. 15, n. 3, p. 557-580, 2009.
- MOREIRA, I. C. *1905: Um ano miraculoso*. A Física na Escola, v. 6, n. 1, 2005.
- MOREIRA, M. A. *A Teoria da Aprendizagem Significativa e sua implementação em sala de aula*. Editora UnB, Brasília, 2006.
- NETO, J. S.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. *Formação de técnicos na área de radiologia médica: Desenvolvimento de uma página da internet como recurso didático*. A Física na Escola, v. 11, n. 1. 2010.
- NAZ, M.; KLASSEN, S.; McMILLAN, B.; METZ, D. *Reconstruction of the history of the photoelectric effect and its implications of general physics textbooks*. Science & Education, v. 94, n. 5, p. 903-931, sep. 2010.
- NOVAK, J. D. *Aprender, criar e utilizar o conhecimento*. Tradução de Ana Rabaça do original Learning, Creating and using knowledge. Lawtence Erlbaum Associates, Inc.1998. Lisboa: Plátano Edições Técnicas. 2000.

- OBEREM, G. E.; STEINBERG, R. N. *Photoelectric Tutor*. Physics Academic Software, American Institute of Physics, College Park, MD, 1999.
- 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, v. 29, n. 3, p. 447-454, 2007.
- OON, P. T.; SUBRAMANIAM, R. *The nature of light: I. A historical survey up to the pre-Planck era and implications for teaching*. Physics Education, v. 44, n. 4, p. 384-391. Jul. 2009.
- 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.
- 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, jan. 2000.
- OSTERMANN, F.; PEREIRA, A. P. *Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente*. Investigações em ensino de Ciências, v. 14, n. 3, pp- 393 – 420. 2009.
- PEDUZZI, L. O. Q.; BASSO, A. C. *Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 545 – 557. 2005.
- PENA, F. L. A. *Por que, nós professores de Física do Ensino Médio, devemos inserir tópicos e idéias de física moderna e contemporânea na sala de aula?* Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 1, p. 1 - 2, 2006.
- PEREIRA, J. L. *Controvérsia entre o modelo corpuscular e ondulatório da luz: um caminho para o ensino de óptica no nível médio*. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ. Rio de Janeiro 2011, pp. 98.
- 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, abr. 1999.
- ROSA, P R da S. *Uma introdução à Pesquisa Quantitativa em Ensino*. 1. ed. Campo Grande: Editora UFMS, 2013. v. 1. 167 p.
- ROSA, P. R. *O Uso de Computadores no Ensino de Física. Parte I: Potencialidade e Uso Real*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 17, n. 2, p. 182-195, dez. 1995.
- SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; FILHO, J. A. C.; PEQUENO, M. C. *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, 3501. 2008.
- SAMBA, K. K. K.; RICARDO, E. C. *Categorias da inserção da História e Filosofia da Ciência no ensino de ciências da natureza*. Revista Educação Pública, v. 23, n. 54, p. 943-970, dez. 2014.
- SANCHES, M. B. *A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Qual sua presença em sala de aula?* Dissertação (Mestrado em Educação) – Programa de Pós-Graduação em Educação para a Ciência e o Ensino de Matemática da Universidade Estadual de Maringá – PPGECM. Maringá, 2006. 112p.
- SANT'ANNA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. G.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*. Volume 03 – Capítulo 17 - 1ª Edição – Ed. Moderna, 2010.

- SED, Secretaria de Educação do Estado de Mato Grosso do Sul (SED-MS): *Referencial Curricular do Ensino Médio*. 1ª Edição, 2012.
- SILVA, A. C.; ALMEIDA, M. J. P. *Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 28, n. 03: p. 624-652, dez. 2011.
- SILVA, A. F. G.; JÚNIOR, J. A. A.; NOBRE, F. A. S. *Ensino de Física Moderna: Um estudo de caso com o ensino público e privado*. Experiências em Ensino de Ciências, v 17, n. 01, pp. 147 – 181, 2012.
- SILVA, B. V. C.; MARTINS, A. F. P. *Júri simulado: um uso da história e filosofia da Ciência no ensino de óptica*. A Física na Escola, v. 10, n. 1, 2009.
- SILVA, J. R. N.; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. *Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos*. Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologias, v. 6, n. 1, jan-abr. 2013.
- SILVA, M. F. *A Taxonomia de Bloom Revisada: Contribuições para a Elaboração do Processo de Avaliação*. II Ciclo de Seminários Pedagógicos – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Apucarana. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/gp/v17n2/a15v17n2.pdf>. Acessado em 04 de julho de 2015.
- SILVA, V. A.; MARTINS, M. I. *ENEM nos Livros Didáticos de Física recomendados pelo PNL D 2012*. Guia de orientação para professores. 2013. Disponível em: http://www1.pucminas.br/imagedb/documento/DOC_DSC_NOME_ARQUI20131205142618.pdf. Acessado em 04 de julho de 2015.
- SOARES, M. T. C.; PINT, N. B. *Metodologia de Resolução de Problemas*. Disponível em: http://www.ufrj.br/emanped/paginas/conteudo_producoes/docs_24/metodologia.pdf. Acessado em 04 de março de 2015.
- SOKOLOWSKI, A. *Teaching the photoelectric effect inductively*. Physics Education, v. 48, n. 1, p. 35-41. 2013.
- 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. 1370–1379. 1996
- STUEWER, R. H. *Historical Surprises*. Science & Education, v. 15, p. 521–530, 2006.
- TERRAZZAN, E. A. *A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.
- TIPLER, P. *FÍSICA: FÍSICA MODERNA*. Vol. 4. 3ª edição. LTC, Rio de Janeiro.1995.
- VALADARES, E. C., MOREIRA, A. M. *Ensinando física moderna no segundo grau: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121-135, ago. 1998.
- VEIT, E. A., THOMAS, G., FRIES, S. G., AXT, R., SELISTRE, L. F. *O efeito fotoelétrico no 2º grau via microcomputador*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 68-88, ago. 1987.
- WHALLEY, M. *The photoelectric effect: a useful sporting analogy*. Physics Education, v. 40, n. 1, p. 503-504, Nov. 2005.
- WHEATON, B. R. (1983). *The tiger and the shark: Empirical roots of wave-particle dualism*. Cambridge, England: Cambridge University Press.

WILLIAMS, G. *Photoelectric effect can be memorable without being expensive*. *Physics Education*, v. 39, n. 2, p. 132 – 134. Mar. 2004.