



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS**

LUCILENE CORREIA RAMOS

**OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E DUALIDADE
ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO DO MODELO ATÔMICO**

Salvador
2018

LUCILENE CORREIA RAMOS

**OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO DO MODELO
ATÔMICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para obtenção do título de mestre em Ensino, Filosofia e História das Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Luis de Paula Barros Silva

Salvador
2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA), com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ramos, Lucilene Correia
OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E DUALIDADE ONDA-
PARTÍCULA NO ENSINO DO MODELO ATÔMICO / Lucilene Correia Ramos.
-- Salvador, 2018.
119 f.

Orientador: José Luis de Paula Barros Silva.
Dissertação (Mestrado - Ensino, Filosofia e História das
Ciências) -- Universidade Federal da Bahia, Universidade
Federal da Bahia, 2018.

1. quantum de uma grandeza. 2. dualidade onda-partícula. 3.
ensino de Química. I. Silva, José Luis de Paula Barros. II.
Título.

LUCILENE CORREIA RAMOS

**OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA NO ENSINO DO MODELO
ATÔMICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito para obtenção do título de mestre em Ensino, Filosofia e História das ciências.

Banca Examinadora

José Luís de Paula Barros Silva (Orientador)
Doutor em Química pela Universidade Federal da Bahia
Professor Associado da Universidade Federal da Bahia

Maria Bernadete de Melo Cunha
Doutora em Ensino, Filosofia e História das Ciências pela Universidade Federal da Bahia/Universidade Estadual de Feira de Santana
Professora Adjunta da Universidade Federal da Bahia

José Fernando Moura Rocha
Doutor em Ensino, Filosofia e História das Ciências pela Universidade Federal da Bahia/Universidade Estadual de Feira de Santana
Professor Associado da Universidade Federal da Bahia

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos e familiares que me apoiaram e incentivaram desde o início desta jornada...

Aos meus colegas do grupo de Química do IFRN, campus Macau, que foram fundamentais ao me acolherem desde minha chegada ao Rio Grande do Norte e especialmente na etapa final e mais desgastante desse processo...

A Arthur, por nunca permitir que o desânimo e as ansiedades da vida me impedissem de continuar e por me ajudar a focar nas coisas boas que vêm logo em seguida ...

Ao professor Zé Luís, por suas orientações e experiências de vida, que desde a graduação têm guiado meu desenvolvimento como pesquisadora, professora e pessoa...

Aos professores José Fernando e Bernadete por aceitarem compor esta banca e assim permitirem meu acesso às suas relevantes contribuições...

A todos vocês, eu agradeço de coração!

Certamente, essa jornada não teria sido tão enriquecedora sem a contribuição que cada um me proporcionou.

Muito obrigada!!

RESUMO

Esta dissertação se refere a uma pesquisa acerca da aprendizagem e do ensino dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico. Investigações realizadas anteriormente pelo nosso grupo de pesquisa apontaram para a existência de problemas de ensino relacionados aos livros didáticos de Química para o ensino médio e, conseqüentemente, para a necessidade de propostas de ensino do modelo quântico do átomo que contribuam para a melhoria do estudo de ciências no nível médio, especialmente no que diz respeito à disciplina Química. No entanto, para desenvolver, organizar e realizar tais propostas, é preciso professores com formação adequada e, por este motivo, optou-se por focar no problema da aprendizagem do modelo atômico quântico em nível universitário, logo, em prováveis professores em formação. A partir dessas considerações delimitou-se nosso objetivo: investigar como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum e dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico. A fundamentação teórica utilizada se baseia nas categorias que compõem um conceito segundo Hardy-Vallée, as quais constituem os elementos mínimos necessários à sua aquisição, e na teoria histórico-cultural, de Vigotski, segundo a qual o emprego do conceito, estimulado por problemas/tarefas colocados pelo meio social, leva ao desenvolvimento conceitual. Sendo assim, buscou-se detectar na linguagem escrita empregada pelos estudantes em uma avaliação do curso de Química por indícios de aquisição e de desenvolvimento dos conceitos abordados. A coleta de dados envolveu primeiramente a escolha da turma de Química Quântica I, por necessariamente abordar os conceitos de interesse a esta pesquisa, bem como, por ser obrigatória também ao curso de licenciatura. Por sua vez, o procedimento de análise dos dados ocorreu pela busca em cada questão das provas por um conjunto de palavras-chaves fundamentais para o que consideramos respostas que atendem aos critérios de inclusão de coisas nos conceitos de nosso interesse; identificou-se também, a organização conceitual que estabeleceram na resolução dos problemas propostos; com base nas palavras-chaves encontradas nas respostas dos estudantes, concluiu-se pela aquisição, ou não, dos conceitos em foco. Os resultados obtidos apontam, de modo geral, para uma aquisição conceitual parcial, evidenciada pela presença de porcentagens significativas de respostas que fogem à organização prevista, indicando também que o processo de desenvolvimento conceitual não atingiu totalmente seu potencial. Paralelamente a estes resultados diretamente relacionados à questão de pesquisa, extraímos também implicações para o ensino no sentido de superar as dificuldades de desenvolvimento conceitual apresentadas pelos estudantes, de modo a contribuirmos para melhorias no ensino do modelo atômico quântico. Como possível desdobramento, propomos elaborar e aplicar sequências didáticas utilizando metodologias que permitam evitar tais entraves à aprendizagem, promovendo um ensino mais eficaz e duradouro tanto na formação de professores, quanto no ensino médio.

Palavras-chave: quantum de uma grandeza, dualidade onda-partícula, ensino de Química

ABSTRACT

This dissertation is about a research on the learning and teaching of the concepts of quantum of a physical quantity and wave-particle duality associated to the quantum atomic model. Investigations made previously by our research group pointed to the existence of teaching problems related to the textbooks of chemistry for high school and, consequently, to the need for teaching proposals for the quantum atomic model that contribute to the improvement of the study of science in high school, especially regarding to chemistry. However, in order to develop, organize and carry out such proposals, we need teachers with adequate training and, for this reason, we opted to focus on the problem of learning on the quantum atomic model at university level, and thus into prospective teachers in training. From these considerations the following research question was delimited: how do chemistry students acquire and develop the concepts of quantum and wave-particle duality associated to the quantum atomic model? Therefore, our objective is to investigate how chemistry students acquire and develop the concepts of quantum of a physical quantity and wave-particle duality associated to the quantum atomic model. The theoretical foundation is based on the categories that make up a concept according to Hardy-Vallée, which are the minimum elements necessary for its acquisition, and in Vygotsky's historical-cultural theory, according to which the use of the concept, stimulated by problems / tasks placed by the social environment, leads to conceptual development. Thus, we try to detect in the written language employed by the students in a course evaluation for evidence acquisition and development of the covered concepts. The data collection involved first of all the choice of the Quantum Chemistry I class, for necessarily address the concepts of interest to this research, as well as being compulsory also for the licentiate course. In turn, the procedure of data analysis occurred through the search in each question of the tests for a set of keywords for what we consider answers that meet the criteria of inclusion of things in the concepts of our interest; it was also identified the conceptual organization that they established in the resolution of the proposed problems; based on the keywords found in the students' answers, was concluded by their acquisition, or not, of the concepts. The results obtained indicate, in general, a partial conceptual acquisition, evidenced by the presence of significant percentages of responses that escape the expected organization, also indicating that the conceptual development process did not reach its full potential. Parallel to these results directly related to the research question, we also extracted implications for teaching in order to overcome the difficulties of conceptual development presented by the students, in order to contribute to improvements in the teaching of the quantum atomic model. As a possible extension, we propose to develop and implement didactic sequences using methodologies to prevent such barriers to learning, promoting a more effective and lasting teaching in teacher training, as in high school.

Key words: quantum of a measure; wave-particle duality; chemistry teaching

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Distribuição espectral do corpo negro em função do comprimento de onda	19
Figura 02	Mapa conceitual: Organização sistemática do conceito quantum de uma grandeza	37
Figura 03	Mapa conceitual: Organização sistemática do conceito de dualidade onda-partícula	38
Figura 04	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 02 em 2015.2	87
Figura 05	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 02 em 2016.1	88
Figura 06	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 07 em 2015.2	89
Figura 07	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 07 em 2016.1	90
Figura 08	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 08 em 2015.2	92
Figura 09	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 08 em 2016.1	93
Figura 10	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 09 em 2015.2	94
Figura 11	Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 09 em 2016.1	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 01	O conceito de conceito: Hardy-Vallée, Vigotski, o quantum de uma grandeza e a dualidade onda-partícula.	42
Quadro 02	Objetivos de ensino dos conceitos de quantum e de dualidade na disciplina Química Quântica	47
Quadro 03	Análise das resoluções à Questão 1	58
Quadro 04	Análise das resoluções à Questão 2	68
Quadro 05	Análise das resoluções à Questão 3	76
Quadro 06	Análise das resoluções à Questão 4	82

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	REFERENCIAIS TEÓRICOS	19
1.1	ALBERT EINSTEIN E O QUANTUM DE RADIAÇÃO	19
1.1.1	O efeito fotoelétrico	23
1.2	LOUIS DE BROGLIE E A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	25
1.3	O ENSINO DO MODELO ATÔMICO QUÂNTICO	29
1.4	O QUE É O CONCEITO, A TEORIA HISTÓRICO-CULTURAL E OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA	32
2	DELINEAMENTO METODOLÓGICO	43
2.1	DELIMITANDO O TIPO DE INVESTIGAÇÃO	43
2.2	O CONTEXTO DA PESQUISA: A DISCIPLINA, O PROFESSOR, O PLANEJAMENTO, AS TURMAS ENVOLVIDAS E A COLETA DE DADOS	45
2.3	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS	48
2.3.1	Questão 01	49
2.3.2	Questão 02	50
2.3.3	Questão 03	50
2.3.4	Questão 04	51
2.3.5	Alunos repetentes	53
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
3.1	GRAVAÇÕES	55
3.2	RESPOSTAS À AVALIAÇÃO EM 2015.2	56
3.2.1	Questão 01	56
3.2.2	Questão 02	66
3.2.3	Questão 03	74
3.2.4	Questão 04	80
3.3	RESPOSTAS À AVALIAÇÃO EM 2016.1: ALUNOS REPETENTES	86
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A	109
	ANEXO B	115
	ANEXO C	119

INTRODUÇÃO

A ideia desta pesquisa emergiu das conclusões obtidas pelo meu trabalho de conclusão do curso de licenciatura em Química, intitulado: *Uma análise das noções de quantum de uma grandeza e de comportamento dual da energia e da matéria no ensino do modelo atômico quântico em livros didáticos de química para o ensino médio* (RAMOS, 2012; RAMOS; SILVA, 2012). Neste trabalho foi realizada uma análise sobre como as noções de quantum de uma grandeza e de comportamento dual da energia e da matéria aparecem nos livros didáticos de química para o ensino médio utilizados nas escolas públicas brasileiras (aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático, PNLD, 2012). Tal análise foi feita com base no relato histórico acerca do desenvolvimento inicial da teoria que deu origem ao modelo atômico quântico, a teoria quântica, a qual indica a importância do entendimento destes dois conceitos para a compreensão de um sistema quântico, como o átomo.

Os resultados desta pesquisa revelaram insuficiências na elaboração dos textos de todas as coleções, principalmente os relacionados à utilização de alguns dos conceitos da teoria quântica sem clareza ou sem articulação com outras informações apresentadas anteriormente no próprio texto. Notou-se que, quando esses livros didáticos apresentam os conceitos de quantização e comportamento dual da radiação e da matéria, o fazem a partir de distorções dos mesmos ou dos relatos históricos relacionados à sua origem. De modo geral, avaliou-se o modo como o modelo quântico do átomo vem sendo ensinado nos livros didáticos de Química como insuficiente para que os estudantes tenham uma visão apropriada deste modelo e de como foi elaborado. Um fato notável é que em nenhum dos casos os autores utilizam o modelo quântico do átomo em outros capítulos, seja para explicar a formação das ligações químicas ou algumas das propriedades periódicas dos elementos químicos, por exemplo, a energia de ionização.

Sendo assim, tais resultados apontaram para existência de um problema de ensino e, conseqüentemente, para a necessidade de investigação de novos modos de ensinar que possibilitem a integração entre uma base teórica de ensino e aprendizagem, os aspectos históricos que consideramos importantes para a compreensão do desenvolvimento da teoria quântica e os próprios conceitos necessários para a compreensão do modelo atômico quântico.

Justificamos a importância de se promover o ensino do modelo atômico quântico, especialmente na formação de professores, bem como de se pesquisar tal tema, com base em quatro aspectos principais:

1. O ensino do modelo atômico quântico, considerado o mais atual, está de acordo com o que se considera como objetivo da escola, a saber, transmitir às novas gerações, de maneira

condensada e atualizada, o conhecimento produzido pela humanidade. Este ponto será desenvolvido posteriormente neste texto (item 1.3) quando defenderemos o ensino do modelo atômico quântico na formação dos professores.

2. Os documentos oficiais que orientam a educação escolar brasileira — em reforma — indicam que o ensino do modelo atômico quântico é recomendado nas atuais Orientações Curriculares para o Ensino Médio para as disciplinas Química e Física e permanece na segunda versão da proposta para a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), para o ensino médio. Sendo assim, as Orientações aqui citadas ainda são as mais atuais em vigor, corroborando para esta justificativa de ensino dos conceitos.

Conforme dito anteriormente, o modelo quântico do átomo é o modelo mais recente utilizado pela comunidade científica com o objetivo de descrever as propriedades dos átomos e das moléculas, bem como, o modo pelo qual interagem entre si e como se transformam. De acordo com os documentos oficiais relativos à educação brasileira (BRASIL, 2002, 2006), ao se estabelecer uma base nacional comum de conteúdos da disciplina Química, deve-se considerar uma visão atualizada dos mesmos.

Salientamos que no presente momento, é orientado que uma visão atualizada dos conteúdos da Química deve “contemplar os avanços tanto no conhecimento químico, quanto nas concepções de Química como ciência, sua historicidade e suas implicações sociais [...]” (BRASIL, 2006). Especificamente no que diz respeito ao ensino do conceito de átomo, orienta-se:

[...] reconhecimento do modelo quântico do átomo como interpretação do comportamento das partículas atômicas a partir de leis da Física moderna fundamentadas em princípios diferentes dos previstos pela Física clássica. (BRASIL, 2006, p.113)

3. A compreensão do modelo atômico quântico passa pelo conhecimento do adjetivo **quântico**, relativo ao conceito de **quantum de uma grandeza**. Portanto, é preciso esclarecer o tal conceito ao longo do ensino deste modelo. Por outro lado, a elaboração formal do modelo atômico quântico se baseia na noção de que a matéria pode apresentar comportamento dual: onda e partícula. Os estados dos elétrons nos átomos são calculados por meio de equações de onda, embora se admita que os elétrons também possam se comportar como partículas, tais como, experimentando processos de colisão (SILVA; CUNHA, 2008). De acordo com a proposta de De Broglie (item 1.2), os sistemas quânticos, em geral, podem apresentar comportamento ondulatório ou material e, átomos são sistemas quânticos. Sendo assim, o estudo da dualidade onda-partícula é importante para a compreensão do modelo atômico quântico.

4. Uma revisão da literatura indica que existem poucas investigações de ensino destes conteúdos, sendo assim, os resultados desta pesquisa podem contribuir positivamente neste sentido.

Buscamos por artigos que contribuíssem para a nossa investigação, nas principais revistas acadêmicas brasileiras na área de ensino de ciências e nos anais mais recentes de dois eventos que consideramos importantes nessa área. As revistas pesquisadas foram as seguintes: *Ciência e Educação*; *Investigações no Ensino de Ciências*; *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*; *Química Nova*; *Química Nova na Escola*; *Revista Brasileira de Ensino de Física*; *Física na Escola* e *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Já os eventos, foram o Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (ENPEC) e o Encontro Nacional de Ensino de Química (ENEQ).

Tal pesquisa foi realizada a partir de uma busca nos sites das publicações e dos eventos por determinadas palavras-chave: quântica; quântico; física moderna; modelo atômico.

De modo geral, é possível perceber que artigos publicados que abordam o ensino de tópicos da teoria quântica ou da física moderna ainda são minoria, quando comparados a outros conteúdos, no que diz respeito ao ensino de Física. Em Química, os números são ainda menores e tal fato acentua a necessidade de investigações como a desta pesquisa, visto que poucas são as propostas publicadas.

Tal fato está em conformidade com Silva e Cunha (2008) ao afirmarem que, apesar de ser previsto o ensino do modelo atômico quântico, ainda há pouca discussão acerca deste assunto no que diz respeito a como ensiná-lo no ensino médio. Inclusive, ao fazerem uma revisão da literatura do período entre 2003 e 2008, concluíram que poucos artigos foram publicados nas principais revistas brasileiras de ensino de ciências neste período. Outro déficit apontado neste trabalho foi que dentre os artigos encontrados sobre o assunto, em nenhum deles se discute a questão da transposição didática, ou seja, de como fazer com que tais conhecimentos sejam transmissíveis e assimiláveis pelos estudantes.

Sendo assim, quase que a totalidade dos artigos aqui citados estão relacionados à busca pela palavra-chave *física moderna*, os quais foram selecionados por abordarem algum aspecto relacionado ao nosso tema de pesquisa.

Dentre estes artigos, há relatos de experimentos de baixo custo utilizados para o ensino da constante de Planck (MOURA et al., 2011); do efeito fotoelétrico (SILVA; ASSIS, 2012) e do conceito de quantização da energia (MELHORATO; NICOLI, 2012). Apesar de serem propostas relevantes de experimentos para o ensino de tópicos da teoria quântica, tais artigos

não relatam resultados de utilização de tais recursos em sala de aula, apenas indicam os materiais, modo de construção e conteúdos que podem ser ensinados a partir dos mesmos.

Por outro lado, dois artigos se diferenciam dos demais por relatarem experiências de sala de aula no ensino de tópicos da física moderna. Primeiramente, temos o trabalho de Moraes e Guerra (2013) que se destaca por, além de abordar uma proposta de sequência didática e uma análise do processo de aplicação da mesma, incluir também uma discussão acerca da utilização da História e Filosofia da ciência no ensino de tópicos da Física Moderna no ensino médio. Os resultados obtidos apontam para melhorias em termos de motivação dos alunos e compreensão dos conteúdos.

Temos também em destaque trabalho publicado por Pagliarini e Almeida (2016) em que relatam a experiência de trabalhar, com um grupo de estudantes do ensino médio, textos de cientistas sobre o início da física quântica. Os autores consideraram que a atividade produziu resultados satisfatórios como metodologia de ensino, uma vez que:

[...] provavelmente pelo fato de a leitura de textos de divulgação científica e de originais de cientistas não ser uma prática comum nas atividades escolares, a diversidade de sentidos produzidos pelos estudantes ao novo assunto, ao mesmo tempo que abre possibilidades para uma maior interação do professor, atenta para a necessidade de sua mediação quanto a dúvidas e equívocos. (PLAGLIARINI; ALMEIDA, 2016, p.299)

No que diz respeito aos eventos, observamos que grande parte dos trabalhos publicados (por exemplo: FIGUEIRA; PEARSON, 2013; KIKUCHI; ORTIZ; BATISTA, 2013; LUZ; HIGA, 2013) são do tipo revisão bibliográfica sobre o ensino de Física Moderna. Consideramos que essas pesquisas também são relevantes, principalmente porque servem como fonte de referências sobre diversas abordagens e discussões sobre um mesmo tema.

Ainda dentro deste tema, o que mais se aproxima da nossa pesquisa é o trabalho intitulado “Física Moderna no Ensino Médio: Uma proposta para implementação do tópico dualidade onda-partícula”, em que as autoras Pimenta e Rodrigues (2015) relatam uma proposta, recorte de uma pesquisa mais ampla, em que se procurou implementar o tópico dualidade onda-partícula no ensino médio utilizando-se do recurso das representações pictóricas, com o objetivo de entender as representações conceituais que os estudantes constroem acerca deste conceito.

Primeiramente, concordamos com as autoras que apontam para o problema da baixa implementação e divulgação de propostas de ensino sobre o tema:

Apesar do conhecimento acerca dos resultados de diversas pesquisas sobre a relevância do ensino dos conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM) pouco se tem divulgado em relação às propostas da sua implementação, assim como dos seus impactos na formação científica dos estudantes

deste nível da escola básica. Em contraposição às inúmeras justificativas para a atualização curricular, haveria ainda poucos testes “práticos” com turmas de EM. (PIMENTA; RODRIGUES, 2015, p.2)

Além disso, consideramos relevantes suas considerações sobre os resultados obtidos pela metodologia aplicada, os quais apontam para a possibilidade de novas formas de ensino:

As análises sugeriram que a sequência didática incluindo aulas abertas ao diálogo, com atividades que envolvam confronto de concepções e discussões em pequenos grupos, assim como entre os grupos, que no geral, incentivem a produção autoral de representações conceituais (neste trabalho, pictóricas), propiciou uma aprendizagem significativa. (PIMENTA; RODRIGUES, 2015, p.9)

É possível então concluir que a crescente publicação de artigos relacionados ao ensino dos conceitos da Teoria Quântica não tem sido suficiente para as demandas do ensino nos nossos dias. Inclusive os poucos artigos que tratam de propostas de ensino, resultados de pesquisas e análise de resultados são, em sua maioria, abordados no contexto da Física, cabendo ao pesquisador selecionar os aspectos em comum com a Química. Ainda assim, muitas vezes, tais publicações não apresentam a profundidade teórica necessária para servirem de base para outros trabalhos.

No entanto, vale ressaltar o aumento do número de artigos, na área de ensino de Química, que abordam o ensino do modelo atômico quântico. Neste sentido, nos últimos anos temos seis artigos, publicados em eventos, que tratam diretamente do tema:

I. No trabalho intitulado “Percepção docente sobre o ensino de Química Quântica no curso Técnico Integrado em informática” (SILVA; CHAGAS, 2015), os autores utilizam como problematização o fato de não existir, no contexto do ensino técnico em informática na instituição pesquisada¹, uma correlação dos conteúdos de Química com as disciplinas da formação técnica e que essa ausência não favorece a proposta de formação sugerida nos documentos oficiais para os cursos técnicos. Ao coletarem dados, via questionário, junto aos professores de Química da instituição, procuraram identificar como os saberes docentes poderiam interferir na inserção de elementos da Química Quântica nas aulas do ensino médio integrado. O principal resultado obtido pela análise dos questionários indica que, para aquele grupo de professores, a dificuldade de ensinar a teoria quântica no ensino médio integrado está relacionada à sua linguagem matemática, que acarreta dificuldades de abordagens por não fazer parte da realidade dos discentes. Os autores concluem pela necessidade de contextualização da teoria quântica no ensino de Química e apontam para a elaboração de material didático voltado para esse contexto específico.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul.

II. Num trabalho posterior, Silva e Chagas (2016) dão continuidade a essa pesquisa, agora relatando uma proposta de sequência didática. Para tanto, sugerem como tema gerador o problema local de saúde pública relacionado à falta de equipamentos para exames de imagem e a partir daí desenvolve-se o conteúdo *números quânticos*, devido à sua estreita correlação com a ressonância magnética. De modo geral, a proposta se baseia em 5 encontros, cada um correspondente a duas horas-aula, em que se intercalam aulas expositivas do conteúdo, leitura de textos e discussões em pequenos grupos e com toda a turma. Apesar de não se tratar de um relato de aplicação da sequência didática, os autores consideram o trabalho relevante para a área por conseguir contextualizar um conteúdo que, em sua pesquisa anterior, um grupo específico de professores demonstrou dificuldade em abordar.

III. No trabalho “Modelo atômico quântico em coleções de química aprovadas no PNL D 2015. Parte I: quantum de energia, dualidade onda-partícula e números quânticos” (RAMOS; SILVA; SILVA, 2015), atualizamos a pesquisa que deu origem a esta dissertação e acrescentamos a busca pelo conceito de números quânticos. Assim como o resultado da nossa pesquisa anterior, a análise de conteúdo revelou que nem todas as obras tratam desses conceitos e, aquelas que os ensinam, ainda não são suficientemente claras e precisas em relação aos mesmos. Concluímos pela necessidade de maior detalhamento na mediação didática acerca dos conceitos investigados, incorporando seus desenvolvimentos históricos e elaborando a argumentação para aumentar sua significação e contribuição ao ensino do modelo atômico.

IV. Outro trabalho do nosso grupo de pesquisa, que contribui para o tema, foi o apresentado por Lima e Silva (2016), em que se destaca o conceito de orbital como sendo de fundamental importância para a compreensão das teorias quânticas do átomo e da ligação química. A investigação parte da constatação de que este conceito surge nos livros de Química do nível superior de formas diferentes, causando confusão e dúvidas nos estudantes, e a partir de então propõe identificar e discutir um sistema de conceitos para o ensino de orbital segundo a Teoria Histórico Cultural, através de mapas conceituais. As conclusões apresentadas estão de acordo com os mesmos preceitos que orientam esta dissertação: o conceito deve estar dentro de um sistema conceitual; a história do conceito deve ser levada em consideração para torna-lo lógico; a tomada de consciência — relacionada ao conceito de aquisição conceitual — se dá quando o estudante percebe a necessidade de utilizar o referido conceito; a utilização de atividades na qual os estudantes utilizem o conceito é imprescindível; e também a averiguação dos conhecimentos trazidos pelo estudante.

V. Ainda como contribuição do nosso grupo de pesquisa, temos o trabalho de Silva e Silva (2016) em que apresentaram na forma de resumo um texto e um mapa conceitual a fim

contribuir para um melhor entendimento e aprendizagem do conceito de números quânticos. O principal destaque do trabalho é a defesa de que o ensino dos números quânticos possibilita discutir o processo de aperfeiçoamento do modelo atômico e ir além, discutindo o modo como a ciência é feita, como a produção de um novo conhecimento para responder a certas questões, tem implicações para explicações de outros fenômenos e como a ciência progride no sentido de desenvolver modelos e explicações mais elaboradas para os fenômenos.

VI. Por fim, temos o artigo de Castro e Cavalcante (2016), também sobre o ensino dos números quânticos. Nessa perspectiva, o objetivo da pesquisa foi analisar os aspectos correlacionados ao ensino dos Números Quânticos no Ensino Médio. Analisaram como os Números Quânticos evoluíram nos livros didáticos ao longo dos anos, e se a forma de organização destes nos livros didáticos contribui para o aprendizado. No entanto, percebe-se que neste artigo, os autores defendem a retirada deste conteúdo dos livros didáticos, pois segundo eles, “a escolha de trabalhar diretamente os Números Quânticos nos livros não contribui para a aprendizagem dos alunos, tendo em vista que o seu entendimento ainda é obscuro e os autores não conseguiram a transposição didática com uma linguagem acessível” (CASTRO; CAVALCANTE, 2016, p.9). Concordamos que a forma como estes conteúdos vêm sendo abordados nos livros didáticos não é a mais adequada, porém defendemos a reformulação desses textos e a formação apropriada dos professores como resolução para este problema e não simplesmente a exclusão do conteúdo.

Com base nesta discussão, apontamos para a necessidade de mais propostas de ensino do modelo quântico do átomo que contribuam para a melhoria do ensino de ciências, especialmente no que diz respeito ao ensino de Química. No entanto, para propor, organizar e realizar tais propostas, é preciso professores com formação adequada e, por este motivo, optamos por focar no problema do ensino do modelo atômico quântico em nível universitário, logo, na formação de professores. Neste caso, contamos com o fato de que os indivíduos devem apresentar maior maturidade cognitiva para apreender o conteúdo e registrar os pensamentos por meio da linguagem escrita, permitindo nossa análise. Vale ressaltar que, dentre os estudantes da turma pesquisada há professores em formação, alunos da licenciatura, e consideramos que sua aprendizagem durante a formação poderá influenciar na sua prática docente no futuro, ecoando os efeitos desta pesquisa para futuras gerações de estudantes.

Dada a importância e apresentadas as justificativas deste trabalho, delimitamos a seguinte questão de pesquisa: *como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico?* Portanto, nosso objetivo é: *investigar como estudantes do curso de Química*

adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum e dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico.

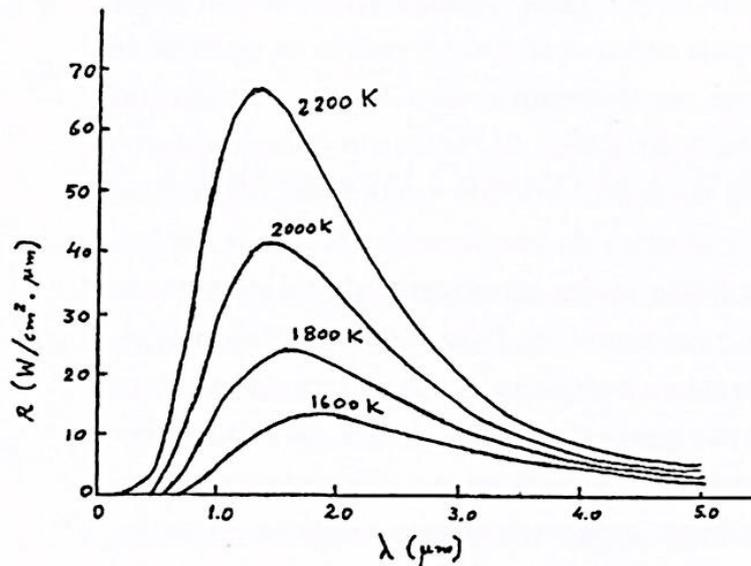
Este trabalho está dividido em 5 partes. Na *introdução*, apresentamos o contexto do tema estudado e delimitamos o problema de pesquisa, o qual norteia todo o desenvolvimento deste trabalho. Na seção seguinte, são apresentados os *Referenciais Teóricos*: o desenvolvimento histórico de alguns conceitos da teoria quântica; o ensino do modelo atômico quântico; aspectos fundamentais de um conceito segundo Hardy-Vallée (2013); e o desenvolvimento do pensamento segundo a teoria histórico-cultural (VIGOTSKI, 2009). No *Delineamento Metodológico*, indicamos os procedimentos metodológicos adotados para coleta e análise dos dados, bem como, o enquadramento desta pesquisa dentro dos tipos de pesquisa acadêmica conhecidos. Finalizando, as seções *Resultados e Discussão* e *Considerações Finais* apresentam os resultados obtidos a partir das categorias de análise definidas e suas conclusões.

1 REFERENCIAIS TEÓRICOS

1.1 ALBERT EINSTEIN E O QUANTUM DE RADIAÇÃO

A radiação térmica é um tipo de radiação emitida por um corpo aquecido. Observou-se experimentalmente que corpos fortemente aquecidos emitem luz e que o brilho da emissão aumenta quando a temperatura cresce. De um modo geral, a cor da luz emitida passa de vermelho fosco a vermelho vivo, a alaranjado, depois amarelo, branco e, finalmente, azulado. Também se constatou experimentalmente a dependência da distribuição dessa radiação em relação ao comprimento de onda, conforme se vê na Figura 01, a seguir, para quatro temperaturas distintas. À medida que o comprimento de onda diminui, a intensidade da radiação emitida pelo corpo alcança um valor máximo e, então, começa a diminuir, tendendo a zero, quando o comprimento de onda também tende a zero — em contradição com as expectativas das teorias da Física conhecidas até então (BROCKINGTON, 2005).

Figura 01 – Distribuição espectral do corpo negro em função do comprimento de onda



Fonte: Ribeiro Filho (2002, p. 306)

A partir desses resultados e das curvas experimentais obtidas, surgiu a contribuição de Planck para o problema do corpo negro ². Estabeleceu-se no meio científico a necessidade de encontrar “uma lei que exprimisse a emissão de radiação de um corpo negro, em função da temperatura e do comprimento de onda” (PESSOA JR, 2005, p. 90). Obviamente, buscou-se a

² Um corpo negro é um modelo teórico de um material que perfeitamente absorve e emite radiação, cuja distribuição espectral depende apenas da temperatura absoluta e não da composição do corpo (BALL, 2005).

solução para esse problema com base nos referenciais teóricos da Física na época: a termodinâmica, o eletromagnetismo e a mecânica estatística. No entanto, foram encontradas apenas soluções parciais para o problema da radiação do corpo negro.

A necessidade de se obter explicação para os resultados experimentais, bem como a execução de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à crescente industrialização na segunda metade do século XIX resultaram no estabelecimento de uma nova área de estudos da Física, a Física Quântica.

O primeiro passo em direção à quantização da energia foi dado por Max Planck³ (1858-1947), em 1900, ao deduzir a expressão da equação da radiação do corpo negro, um problema em aberto até então. A partir da consideração de que as paredes de um corpo negro eram constituídas por uma quantidade definida de osciladores, responsáveis pela emissão e absorção de radiação, Planck sugeriu que sua energia total deveria estar distribuída de maneira descontínua, em um número definido de partes, cada parte com uma energia mínima dada por $\varepsilon = h \cdot \nu$ (em que ε corresponde aos valores dos elementos da energia distribuída entre os osciladores; h é uma constante universal, posteriormente denominada constante de Planck; e ν é a frequência natural de um dado oscilador).

A introdução de tais elementos de energia, ε , foi feita por Planck como um artifício matemático a fim de que a equação deduzida para a radiação do corpo negro mantivesse uma concordância com os dados empíricos. O relato histórico indica que, pelo menos nesse período inicial, Planck não supôs que a energia de cada oscilador fosse, de fato, descontínua (ROSA, 2004). De todo o modo, assim foi introduzida a noção de descontinuidade dos estados energéticos de um sistema que emite e absorve radiação eletromagnética.

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955) relatou suas primeiras considerações sobre a teoria quântica no artigo intitulado “Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e da transformação da luz” (EINSTEIN, 2005).

Na primeira parte deste artigo, Einstein relata as contradições resultantes de se tentar aplicar a teoria ondulatória à explicação dos fenômenos relacionados à emissão e transformação da luz. Para tanto, ele considera um modelo semelhante ao corpo negro, cujas paredes perfeitamente refletoras seriam constituídas por moléculas de gás que se movem livremente e por elétrons que atuam como ressonadores – absorvendo e reemitindo radiação

³ O prêmio Nobel de Física de 1918 foi atribuído a Planck “em reconhecimento dos serviços que ele prestou ao avanço da física por sua descoberta de quanta de energia” (MAX... 2014).

eletromagnética de períodos definidos. O resultado obtido a partir desta abordagem é uma relação para o equilíbrio dinâmico correspondente às interações entre estas moléculas e elétrons, no entanto, a mesma aponta para uma condição em que quanto maior o intervalo das frequências do ressonador, maior a energia de radiação total, sendo que no limite máximo, este valor tenderia ao infinito. Obviamente, esta seria uma conclusão em desacordo com os fatos experimentais.

A essência da cadeia de raciocínios que o levou à hipótese de que a energia de um raio de luz emitido não seria distribuída por volumes cada vez maiores do espaço, mas sim como um número finito de quanta⁴ de energia, é a interpretação da expressão para a dependência da entropia em relação ao volume da radiação monocromática, de acordo com o princípio de Boltzmann. Temos a seguir uma breve síntese da fundamentação básica dessa interpretação de Einstein⁵:

1. Einstein determina a variação da entropia da radiação do corpo negro a partir da lei de Wien — sabendo que esta será válida dentro de determinados limites — e de relações termodinâmicas, obtendo a equação:

$$S - S_0 = \frac{E}{\beta v} \ln \left[\frac{V}{V_0} \right] \quad (1)$$

2. Desta equação conclui que a entropia da radiação monocromática varia com o volume de acordo com a mesma lei que a entropia de um gás ideal ou de uma solução diluída.
3. Utilizando o modelo de um sistema composto por n partículas em movimento, sem interação mútua e movendo-se sem direção definida — um gás ideal ou solução diluída — interpreta o princípio de Boltzmann, segundo o qual a entropia de um estado é função da probabilidade de seu estado:

$$S - S_0 = \frac{R}{N} \ln W \quad (2)$$

4. Considerando W a probabilidade relativa do estado de entropia S , então num instante de tempo aleatório, a probabilidade de todas as n partículas, movimentando-se

⁴ Quanta (plural de quantum): Unidades de energia “localizadas em pontos do espaço, que se movem sem se dividir e que podem ser absorvidos ou gerados somente como unidades integrais” (EINSTEIN, 2005, p. 202).

⁵ São dadas, na ordem em que aparecem, as seguintes grandezas/constantes e seus símbolos: S = entropia da radiação em relação ao volume v ; S_0 = entropia da radiação em relação ao volume v_0 ; E = energia da radiação; β = constante proveniente da lei de Wien; v = frequência da radiação (monocromática); v_0 = volume inicial ocupado pela radiação; v = porção do volume inicial; R = constante universal dos gases; N = número de “moléculas reais” em um equivalente-grama (constante de Avogadro).

independentemente, no volume inicial V_0 , sejam encontradas no volume V — menor que V_0 — é dado pela equação 03:

$$W = \left(\frac{V}{V_0}\right)^n \quad (3)$$

5. Pela aplicação desta relação ao princípio de Boltzmann, obtém-se a equação 4, que representa a variação de entropia relacionada a esta variação de volume:

$$S - S_0 = R \frac{n}{N} \ln \left(\frac{V}{V_0}\right) \quad (4)$$

6. Reescrevendo a equação 1 na forma: $S - S_0 = \frac{R}{N} \ln \left[\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \right]$ e comparando-a às equações 2 e 3, tem-se a equação 5:

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^n = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\frac{N E}{R \beta v}} \therefore n = \frac{N E}{R \beta v} \therefore E = \frac{R \beta v}{N} \quad (5)$$

Desta última relação, Einstein chega à conclusão do seu raciocínio, que hoje entendemos como um dos fundamentos da teoria quântica:

A partir disso podemos concluir também que a radiação monocromática de baixa densidade (dentro dos limites de validade da fórmula de radiação de Wien) comporta-se termodinamicamente como se ela consistisse em quanta de energia mutuamente independentes de magnitude $R\beta v/N$. (EINSTEIN, 2005, p. 215)

Em síntese, podemos afirmar que a principal contribuição de Einstein para a ampliação do conceito de quantização, neste primeiro momento, foi provar que sob delimitadas condições — radiação monocromática de baixa densidade e grande frequência, partículas que se movem independentemente e sem qualquer interação mútua e, principalmente, analisando-se exclusivamente sob o ponto de vista da variação de entropia — a radiação poderia ser entendida como um conjunto de quanta de energia de valor unitário igual a $\frac{R\beta v}{N}$ (MARTINS; ROSA, 2014). De fato, sua proposta não era explicar todos os fenômenos da luz, pois como ele mesmo afirmou, “A teoria ondulatória da luz [...] provou-se sobremaneira adequada na descrição de fenômenos puramente ópticos, e provavelmente *nunca será substituída por outra teoria* (grifo nosso)” (EINSTEIN, 2005, pp. 201-202). No entanto, após a elaboração deste raciocínio, Einstein propõe investigar, para além destas condições limitadas, se alguns fenômenos relacionados à emissão e transformação da luz poderiam ser explicados considerando-se a luz como sendo constituída pelos quanta de energia, a saber: o processo de transformação da luz absorvida e emitida por fotoluminescência; a emissão de raios catódicos quando corpos sólidos

são atingidos pela luz — efeito fotoelétrico, de maior relevância para este trabalho; e a ionização de gases por radiação ultravioleta.

Com base nessa fundamentação teórica sobre o desenvolvimento inicial da teoria quântica, entendemos o conceito de quantum de uma grandeza — ampliando para além da energia — como uma quantidade elementar da grandeza em foco. Grandezas cujos valores são discretos, descontínuos em relação aos demais, são ditas quantizadas. Nos osciladores de Planck, a energia é quantizada; no modelo atômico de Bohr, o momento angular, o raio e a energia são quantizados. Por sua vez, entendemos um sistema quântico como um sistema que apresenta alguma propriedade quantizada. Tais sistemas pertencem aos níveis atômico-molecular e subatômico, da natureza. Sistemas que pertencem ao nível macroscópico não costumam apresentar quantização de suas propriedades.

1.1.1 O efeito fotoelétrico

O efeito fotoelétrico é o fenômeno em que a luz produz emissão de elétrons ao atingir um material. Em 1887, Heinrich Hertz observou efeitos elétricos associados à incidência de luz sobre metais e, em 1899, com a descoberta do elétron por J. J. Thomson, passou-se a identificar tais efeitos elétricos como uma emissão de elétrons.

Alguns resultados típicos do efeito fotoelétrico foram identificados em experiência posteriores, a saber: a luz ultravioleta (de alta frequência) produzia os melhores resultados em termos de emissão; a frequência da luz incidente no metal influenciava nos resultados, sendo que abaixo de uma determinada frequência, denominada frequência limiar, não ocorria emissão de elétrons, ao passo que para frequências acima deste valor, o efeito ocorria; a intensidade da luz não tinha qualquer efeito sobre a velocidade dos elétrons emitidos, apenas tinha efeito na quantidade de elétrons emitidos; por outro lado, quanto maior a frequência da luz incidente (desde que acima da frequência limiar) maior a velocidade dos elétrons emitidos (PAIS, 1982; BALL, 2005).

Tais resultados constituíam um fenômeno que não poderia ser explicado pela teoria eletromagnética, aceita na época como a única forma de interpretação dos fenômenos luminosos. A principal contradição entre os fatos experimentais observados e o modelo ondulatório da luz vem do fato de a intensidade da luz não ter efeito sobre a energia dos elétrons emitidos. De acordo com tal modelo, a intensidade da luz pode ser representada como o fluxo médio de energia que atinge o objeto, o instrumento ou nossos olhos, por unidade de tempo e

área (NUSSENZVEIG, 1998). Sendo assim, a luz de maior intensidade deveria resultar na emissão de elétrons com maior energia cinética, no entanto, a energia cinética aumenta apenas com o aumento da frequência da luz, sendo independente da sua intensidade.

A explicação de Einstein para este fenômeno — ao qual ele se refere como emissão de raios catódicos (elétrons) por meio da iluminação de corpos sólidos — é consequência da ideia de que a luz incidente seria composta por quanta de energia, conforme discutido anteriormente. Segundo sua hipótese, cada quantum de luz, ao atingir a superfície do sólido, transfere integralmente sua energia⁶ ($h\nu$) para um elétron que, por sua vez, a converte parcialmente em energia cinética. Este processo ocorre do seguinte modo: o elétron ao ser atingido por um quantum de luz, absorve seu conteúdo energético, mas também perde parte desta energia na forma de trabalho ϕ (característico do corpo) ao ser arrancado desta superfície. Sendo assim, a energia cinética dos elétrons que são ejetados do corpo é dada por $h\nu - \phi$, em que ν é a frequência da luz incidente (EINSTEIN, 2005).

A partir de tal proposição, Einstein deriva algumas conclusões sobre o efeito fotoelétrico:

1. Considerando correta a expressão obtida, o gráfico cartesiano da energia cinética do elétron ejetado em função da frequência da luz incidente, deve fornecer uma linha reta cuja inclinação é independente da natureza da substância em análise.

2. Se cada quantum de energia da luz incidente transmite sua energia a um elétron, independentemente de todos os outros, então, a distribuição de velocidade dos elétrons, será independente da intensidade da luz incidente; por outro lado, sobre circunstâncias de outro modo idênticas, o número de elétrons que deixa o corpo será proporcional à intensidade da luz incidente. Em resumo: aumentar a intensidade da radiação significa aumentar o número de quanta de luz projetados. Explica-se assim o fato de que o aumento da intensidade da luz resulta no aumento do número de elétrons emitidos sem aumento da energia cinética dos mesmos.

3. Por outro lado, quando a frequência da luz incidente aumenta, isto significa que estão sendo projetados quanta de maior energia. Ou seja, os quanta de luz diferem uns dos outros pelo seu conteúdo energético, a depender da frequência da luz com que são projetados. Conseqüentemente, quanto maior a frequência da luz projetada, maior a energia dos quanta, resultando numa maior energia cinética dos elétrons emitidos, de acordo com o processo proposto por Einstein e explicado acima.

⁶ Considerando que $\frac{R\beta}{N}$ corresponde à constante “h” de Planck.

Vale salientar que, em 1916, a hipótese de Einstein foi experimentalmente comprovada por Millikan e, conforme este mesmo afirma em seu discurso ao receber o prêmio Nobel de Física de 1924, depois dele, outros cientistas, por diferentes métodos, chegaram à mesma comprovação:

Mas, no momento, não é demais dizer, que a prova completamente esmagadora fornecida pelas experiências de muitos observadores diferentes, trabalhando por diferentes métodos em muitos laboratórios diferentes, que a equação de Einstein é de validade exata (sempre dentro dos atuais pequenos limites de erro experimental) e de aplicabilidade muito geral, é talvez a realização mais notável de Física Experimental durante a última década. (MILLIKAN, 1924, p. 62)

1.2 LOUIS DE BROGLIE E A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

Os estudos de Einstein influenciaram grandemente Louis de Broglie (1892-1987), que considerou a hipótese de a matéria ter comportamento ondulatório, numa relação simétrica com a dualidade da radiação: “se ondas se comportam como partículas, partículas talvez se comportem como ondas” (BROCKINGTON, 2005, p. 43). De fato, em seu discurso na cerimônia em que recebeu o prêmio Nobel de Física, em 1929, de Broglie aponta para dois aspectos — considerava-os como enigmas — que foram o ponto de partida para seus estudos sobre a natureza da luz: a necessidade de assumir para a luz duas teorias que em sua natureza são contraditórias — a das ondas e a das partículas — bem como, explicar o porquê de, entre infinitas possibilidades de movimentos que os elétrons poderiam ter no átomo, apenas alguns seriam possíveis, conforme o modelo atômico proposto Bohr (DE BROGLIE, 1929).

Sobre o primeiro destes aspectos, de Broglie entendia que uma teoria puramente corpuscular para luz não poderia ser considerada satisfatória, uma vez que a equação $E = h \cdot \nu$, que define a energia de uma partícula de luz, varia de acordo com a frequência ν e uma teoria corpuscular não poderia permitir incluir o conceito de frequência. Para ele, apenas este aspecto seria suficiente para se entender a necessidade de uma teoria que apresentasse simultaneamente o conceito de onda e de partícula para a luz. Para além deste aspecto inicial, o fato de que os movimentos dos elétrons nos átomos seriam determinados por números inteiros, segundo postulado por Bohr, parecia estar relacionado aos dois únicos outros fenômenos ondulatórios, conhecidos até então, que também envolviam variações em números inteiros: interferências e modos normais de vibração. Esta relação então apontava para a ideia de que também os elétrons não deveriam ser representados por uma teoria puramente corpuscular. Sendo assim, de Broglie declara:

Isso sugeriu a ideia para mim que elétrons não poderiam ser representados como simples corpúsculos, mas também deveria haver uma periodicidade relacionada com eles. Eu, então, cheguei à seguinte conclusão que guiou meus estudos: para ambos, matéria e radiação, luz em particular, é necessário introduzir o conceito corpuscular e o conceito ondulatório ao mesmo tempo. Em outras palavras, a existência de corpúsculos acompanhados por ondas tem de ser considerada em todos os casos. Contudo, como corpúsculos e ondas não podem ser independentes porque, de acordo com a expressão de Bohr, estes constituem duas forças complementares da realidade, deve ser possível estabelecer um certo paralelismo entre o movimento de um corpúsculo e a propagação de uma onda associada. O primeiro objetivo a alcançar seria, portanto, estabelecer essa correspondência. (BROGLIE, 1929, p. 247)

O raciocínio elaborado por de Broglie parte da ideia do “átomo de luz” como sendo uma pequena região do espaço dentro da qual a energia está altamente concentrada formando uma unidade indivisível, cuja energia total é dada por E e para a qual, pelo princípio da inércia da energia, pode-se atribuir uma massa de repouso (m_0) obtida pela expressão: $E = m_0c^2$ (sendo c a velocidade da luz no vácuo). Ao mesmo tempo, o princípio expresso pela lei de Einstein para o quantum de luz indica que seria impossível considerar uma quantidade isolada de energia sem atrelar a esta uma determinada frequência, dado que: $E = hv_0$. Comparando-se estas duas equações, temos a hipótese fundamental da teoria de de Broglie, segundo a qual “cada elemento de energia de massa m_0 está associado a um elemento periódico com frequência (v_0) dada por $v_0 = \frac{m_0c^2}{h}$, sendo medida no referencial de repouso do pacote de energia” (SANTOS, 2010, p. 19).

Reorganizando esta igualdade proposta por De Broglie ($v_0 = \frac{m_0c^2}{h}$), a qual chamaremos de equação 01 podemos chegar à equação em que se estabelece que o comprimento de onda de uma partícula é inversamente proporcional a seu momento, a partir da substituição da velocidade da luz (c) por uma igualdade equivalente (BALL, 2005):

I) Partindo da conversão padrão de que a velocidade da luz é igual à sua frequência multiplicada por seu comprimento de onda ($c = \lambda v \therefore v = \frac{c}{\lambda}$), podemos substituir a frequência v na equação 01, obtendo a equação 02:

$$\frac{hc}{\lambda} = m_0c^2 \quad (2)$$

II) Cancelando c em ambos os lados da equação e reorganizando-a, temos:

$$\lambda = \frac{h}{m_0c} \quad (3)$$

III) Sabendo que o produto entre a massa e a velocidade é o momento (p), temos por fim que:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4)$$

Esta equação 4 é identificada como a equação de De Broglie para as partículas — sendo uma interpretação proveniente da sua formulação principal para a dualidade — pois implica que uma partícula de massa m_0 pode se comportar como onda, uma vez que, há um comprimento de onda λ diretamente relacionado a esta.

Sustentado por este raciocínio e pela ideia de uma onda associada à partícula, De Broglie estabelece os princípios básicos da sua teoria, os quais são apresentados nos dois primeiros dos três artigos publicados em 1923⁷. De acordo com Rosa (2004), podemos destacar os seguintes aspectos a partir destes artigos:

1. Não há diferença entre as partículas de luz e outras partículas, como os elétrons.
2. A teoria da relatividade aplica-se a todas as partículas.
3. Todas as partículas possuem massa de repouso diferente de zero⁸ e velocidades inferiores à velocidade da luz no vácuo – velocidade limite da teoria da relatividade.
4. A todas as partículas as relações $E = hv$ e $E = mc^2$ são aplicáveis.
5. Todas as partículas apresentam algum tipo de fenômeno periódico, cuja frequência própria é dada por $\nu_0 = m_0c^2/h$.
6. Qualquer partícula tem uma onda associada cuja velocidade⁹ é dada pela expressão $V = c/\beta$ ($\beta < 1$) e a frequência por $\nu = mc^2/h$.
7. As oscilações da partícula e da sua onda associada estão sempre em fase.
8. Quando a partícula se movimenta em trajetória fechada, o movimento só será estável se a partícula e a onda associada estiverem em fase.
9. A velocidade dos corpúsculos corresponde à velocidade de grupo de um conjunto de ondas de fase com frequências próximas entre si.

⁷ *Waves and quanta* (BROGLIE, 1923a); *Quanta de lumière, diffraction et interférences* (BROGLIE, 1923b); e *Les quanta, la théorie cinétique des gaz et le principe de Fermat* (BROGLIE, 1923c).

⁸ De acordo com Brockington (2005), De Broglie insistiu durante muito tempo na existência de uma massa de repouso – uma hipótese que foi rejeitada. Langevin havia sugerido que ele utilizasse $\nu_0 = m_0 = 0$.

⁹ Em relação a esta velocidade V , Rosa afirma que “De Broglie apenas diz que, como a velocidade da onda é superior a c , ela não pode transmitir energia, e deve ser considerada como uma *onda fictícia*” (ROSA, 2004, p.106).

10. Na ausência de forças externas, as partículas não obedecem à lei da inércia, mas se movem segundo raios perpendiculares às frentes de onda das ondas de fase associadas às mesmas.
11. Todas as partículas podem sofrer difração ao passar por fendas estreitas.
12. A probabilidade de interação entre uma partícula e a matéria é proporcional à intensidade da onda associada à partícula, em cada ponto do espaço.
13. Tais princípios explicam os fenômenos de difração e interferência da luz e têm como consequência a emissão estimulada de luz.

Em 1927, foi observada a difração de elétrons em cristais em dois experimentos independentes¹⁰, considerada como a primeira comprovação do caráter ondulatório de sistemas materiais.

Cabe aqui salientar que este novo entendimento deu origem também a um embate filosófico sobre a natureza deste comportamento dual e sobre a que se refere a Teoria Quântica como um todo.

De acordo com Brockington (2005), existem pelo menos quatro interpretações neste sentido: 1. Pela interpretação ondulatória, todos os objetos quânticos teriam uma ontologia ondulatória, de modo que antes do momento de detecção, se propagaria como uma onda, porém, ao ser detectado, localiza-se numa delimitada partícula de onda; 2. Na interpretação corpuscular, atribui-se uma ontologia corpuscular aos objetos quânticos, sem a necessidade de estar a eles associada qualquer propriedade ondulatória, esta visão considera a Mecânica Quântica como essencialmente estatística, não fornecendo uma descrição completa da natureza; 3. Segundo a interpretação dualista realista, atribui-se uma ontologia dual para o objeto quântico, ou seja, o concebe constituído de duas partes: uma partícula e uma onda a ela associada; 4. Por fim, temos a interpretação da complementaridade, segundo a qual:

Os objetos quânticos podem ser corpusculares ou ondulatórios, mas nunca os dois ao mesmo tempo. Esta interpretação não atribui qualquer ontologia a estes objetos até que eles sejam observados. Assim, só se pode atribuir a eles uma realidade após o ato da medição. (BROCKINGTON, 2005, p.57)

Atualmente, concordamos com o entendimento — oriundo da teoria de De Broglie, mas corrigido em alguns aspectos que não foram discutidos por ele — que apresenta o conceito de dualidade onda-partícula como: propriedade de sistemas quânticos, como os átomos e a luz,

¹⁰ O Prêmio Nobel de Física 1937 foi atribuído conjuntamente a Clinton Joseph Davisson e George Paget Thomson "pela descoberta experimental da difração de elétrons por cristais" (THE..., 2014).

que apresentam, em algumas situações, comportamento de partícula e, em outras, comportamento ondulatório. Esta visão se aproxima da interpretação da complementaridade.

A aparente contradição desta ideia de dualidade onda-partícula vem do fato de objetos quânticos apresentarem comportamento tanto de partícula, que é uma entidade localizada e de dimensões limitadas, como de onda, que não é. Uma resposta a esta contradição, seria que estes entes não seriam nem partícula, nem uma onda, mas algo distinto. Seria, portanto, impossível dar uma descrição gráfica precisa do seu comportamento usando os conceitos de onda ou de partícula da física clássica. Vale salientar que, apesar de apresentarem o comportamento dual, entes quânticos não são um único e mesmo tipo de entidade. Por exemplo, ao passo que a luz é composta por fótons, que se movem sempre à velocidade c e têm massa de repouso nula, os átomos apresentam os elétrons, que sempre têm velocidade menor que c e massa de repouso não nula. Logo, os fótons devem ser tratados de forma relativista, enquanto que os elétrons, que se movem a uma velocidade v muito menor que c , podem tratar-se de forma não relativista.

1.3 O ENSINO DO MODELO ATÔMICO QUÂNTICO

Conforme citado na introdução desta pesquisa, um dos critérios que justifica a relevância deste trabalho vem do fato de que o ensino do modelo atômico quântico, considerado o mais atual, está de acordo com o que se considera como objetivo da escola, a saber, transmitir às novas gerações, de maneira didatizada e atualizada, o conhecimento produzido pela humanidade.

De fato, o ensino do modelo atômico quântico envolve conceitos da física moderna (quantum de uma grandeza, dualidade onda-partícula da radiação e da matéria etc.) que emergiram a partir de fatos experimentais e discussões teóricas relativamente recentes (a partir do século XX), quando comparados aos conceitos da física clássica. No entanto, apesar de toda a influência desta tecnologia moderna e do conhecimento científico em que ela se baseia em nosso cotidiano, nota-se que este é um conhecimento dominado por uma pequena parcela da sociedade e que um passo importante para a sua disseminação é a inserção destes conteúdos no currículo escolar. Tais ideias são compartilhadas por Sforni (2004) que, ao discutir o saber escolar, afirma:

Se o que há de mais desenvolvido é produzido, apropriado e manipulado apenas por um pequeno grupo social, isso não significa que essa cultura lhe pertence, e que, portanto, deve ser desprezada pelos demais, sob o risco de apenas incorporá-la como elemento de submissão. Em primeiro lugar, o que é produzido não é resultado de um esforço individual ou de um grupo, mas da ação sobre um legado social e

historicamente acumulado; portanto, não pertence a um grupo, mas à sociedade geradora das condições que possibilitaram o seu desenvolvimento. Em segundo lugar, interagir com uma determinada cultura não significa aceitá-la ou incorporá-la, mas adquirir condições para estabelecer diálogos que possam levar tanto à conformação quanto à negação. (SFORNI, 2004, p.24)

Entendemos que, à medida em que justificamos o ensino do modelo atômico quântico para estudantes do nível médio, estamos justificando também a importância de uma abordagem mais específica desse tema na formação dos professores de Química que promoverão essa aprendizagem.

Neste sentido, concordamos com Carvalho e Gil-Pérez (1998) quando afirmam, em sua análise crítica sobre formação dos professores de ciências, o seguinte:

[...] a tônica geral das atividades de formação permanente é deixar de lado o que se refere a conteúdos científicos, admitindo-se, assim, implicitamente que é suficiente a preparação proporcionada neste aspecto pela formação inicial. No entanto, é cada vez mais evidente que não só essa preparação costuma ser insuficiente, mas também que [...] *uma falta de conhecimentos científicos constitui a principal dificuldade para que os professores afetados se envolvam em atividades inovadoras*. Todos os trabalhos investigativos existentes mostram a gravidade de uma carência de conhecimentos da matéria, o que transforma o professor em um transmissor mecânico dos conteúdos do livro de texto. (CARVALHO; GIL-PÉREZ, 1998, p. 20-21)

Isto é, a falta de uma fundamentação teórica no conteúdo específico da área, ou insuficiências neste aspecto no momento da formação inicial do professor, muito provavelmente irá repercutir na sua prática docente, fato evidenciado muitas das vezes pela limitação aos conteúdos conforme aparecem nos livros didáticos e pela propagação de metodologias características do ensino tradicional.

No que diz respeito ao ensino do modelo atômico quântico, defendemos o enfoque deste conteúdo na formação docente a partir de dois aspectos principais: primeiramente, já citamos que pesquisas bibliográficas realizadas tanto por nosso grupo de pesquisa, como por outros, indicam que os livros didáticos não apresentam uma fundamentação teórica suficiente para orientar professores e alunos, no ensino e na aprendizagem, respectivamente, dos conceitos envolvidos, significando que, no caso de o professor não estar bem fundamentado no assunto, esse ensino também será insuficientemente eficaz; além disso, concordamos com Carvalho e Gil-Pérez (1998) que apontam para a necessidade de o professor conhecer os problemas que deram origem à construção de determinados conhecimentos científicos, até mesmo como maneira de compreender as dificuldades dos alunos no desenvolvimento conceitual, bem como para a importância de o professor ter algum conhecimento dos desenvolvimentos científicos recentes, de modo a transmitirem uma visão correta de ciência, como construção humana não-fechada e acessível aos alunos.

Neste sentido, como discutir a origem e o desenvolvimento dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula com alunos da graduação — prováveis futuros professores de Química — contribui para fundamentar teoricamente sua compreensão sobre o modelo atômico quântico?

Partimos do entendimento de que o modelo quântico do átomo, desenvolvido com base na teoria quântica, é o modelo atômico mais recente utilizado pela comunidade científica com o objetivo de descrever as propriedades dos átomos e das moléculas, bem como, o modo pelo qual interagem entre si e como se transformam. De acordo com Silva e Cunha (2008), um sistema quântico, como o átomo, é caracterizado por cinco aspectos que são fundamentais para o seu entendimento:

- a) A noção de *quantum* de uma grandeza.
- b) A noção de que matéria e energia apresentam um comportamento dual. Ou seja, ambos apresentam tanto comportamento corpuscular, quanto comportamento ondulatório.
- c) A trajetória de um sistema quântico é indefinida, pois é impossível determinar com exatidão sua posição e velocidade num dado instante (Princípio da Incerteza).
- d) O estado de um sistema quântico é representado por uma função de onda (Ψ) resultante da solução da equação de Schrödinger.
- e) Caráter probabilístico da localização de um sistema quântico.

Detalhando um pouco mais sobre a participação desses dois conceitos na formulação do modelo atômico quântico e, corroborando com a ideia defendida de que é importante na formação inicial do professor conhecer o desenvolvimento de alguns conceitos-chave, destacamos brevemente algumas das construções teóricas envolvidas.

Conforme dito anteriormente, a teoria quântica foi elaborada a partir das considerações teóricas publicadas por Planck em 1900 e consolidada apenas ao final dos anos 1920, com a formulação das suas equações fundamentais. Ao longo desse período vários pesquisadores e alguns fatos experimentais relevantes contribuíram para o advento da teoria quântica. Dentre as ideias e descobertas experimentais mais importantes nesse período, podemos citar:

1. A solução para o problema do corpo negro a partir da suposição de que a energia deveria ser dividida em quantidades definidas, cujo valor mínimo seria obtido pela relação: $\varepsilon=h.v$, elaborada por Planck em 1900.
2. A ampliação da teoria de Planck feita por Albert Einstein em 1905 ao considerar que, ao interagir com a matéria, os *quanta* de luz apresentam comportamento de partícula.
3. O modelo atômico de Bohr (1913) e a explicação para os espectros atômicos.

4. A explicação para o efeito fotoelétrico e a descoberta do *efeito Compton* no início dos anos 1920, os quais pareciam confirmar a ideia de comportamento corpuscular da luz.
5. A teoria de Louis de Broglie (1923) de que partículas em movimento (por exemplo, elétrons) teriam um comportamento ondulatório associado.
6. A primeira formulação matemática da Mecânica Quântica feita por Heisenberg em 1925 ao tentar calcular a intensidade das linhas espectrais para o átomo de hidrogênio.
7. A formulação da equação de Schrödinger (1926), uma equação diferencial parcial utilizada para descrever as ondas de matéria (função Ψ), a segunda e mais famosa formulação matemática da Mecânica Quântica, inspirada nas ideias de De Broglie.

Sendo assim, fica clara a necessidade de se compreender que os conceitos de quantização e de dualidade onda-partícula são fundamentais ao desenvolvimento do modelo atômico quântico, constituindo dois dos seus princípios teóricos fundantes.

Cabe aqui a observação de que esta dissertação faz parte de uma série de investigações de um mesmo grupo de pesquisa, voltado para o ensino do modelo atômico quântico. Portanto, neste trabalho discutimos apenas dois dos conceitos fundamentais à compreensão deste modelo atômico, ao passo que os demais integrantes discutem, em seus respectivos trabalhos, os demais conceitos. Deste modo, o grupo pretende contribuir para o ensino do modelo atômico quântico pela discussão de todos os seus principais aspectos.

1.4 O QUE É O CONCEITO, A TEORIA HISTÓRICO-CULTURAL E OS CONCEITOS DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

No intuito de compreender se houve aquisição de novos conceitos na dada situação de pesquisa, consideramos necessário estabelecer primeiramente o conceito de conceito adotado e quais aspectos e características incluem o conhecimento trabalhado sob a identidade de conceito, especificamente de conceito científico.

Partimos da ideia de conceitos como “universais abstratos, organizados sistematicamente, que aplicam a representação de propriedades invariantes de uma categoria a objetos particulares em função de um critério” (HARDY-VALLÉE, 2013, p. 20), ou, em outras palavras, um conceito é um conhecimento geral que se aplica a um determinado objeto, evento ou situação ao passo que representa toda a categoria que envolve tal objeto, evento ou situação. De fato, ser um universal abstrato significa que o conceito representa as propriedades comuns a todos os

elementos de uma categoria, mas não inclui todas as propriedades de todos os casos particulares que abarca.

Entender o conceito de conceito e os aspectos que o compõem é de grande importância na investigação sobre aprendizagem e desenvolvimento conceitual, no contexto da educação científica, devido ao papel central dos conceitos na elaboração do pensamento. Utilizaremos aqui as ideias de aprendizagem como a aquisição de um conceito e de desenvolvimento conceitual como um processo complexo que envolve um conjunto de aprendizagens relacionadas entre si e referentes ao emprego do conceito.

O conceito se situa no centro da atividade cognitiva, uma vez que é a mobilização de conceitos que nos permite pensar e obter conhecimento (HARDY-VALLÉE, 2013). Em concordância com tal ideia, a teoria histórico-cultural reforça o pensamento de que o emprego do conceito, estimulado por problemas/tarefas colocados pelo meio social, leva ao desenvolvimento conceitual:

[...] o caráter da tarefa, o objetivo que o adolescente tem diante de si e pode atingir através da formação de conceitos é, sem dúvida, um dos momentos funcionais sem cuja incorporação não poderemos explicar plena e cientificamente a formação do conceito. É precisamente com o auxílio dos problemas propostos, da necessidade que surge e é estimulada, dos objetivos colocados perante o adolescente que o meio social circundante o motiva e o leva a dar esse passo decisivo no desenvolvimento do seu pensamento. (VIGOTSKI, 2009, p. 171)

Do ponto de vista filosófico (HARDY-VALLÉE, 2013), um conceito possui, ao menos, cinco aspectos fundamentais, a saber: invariante, critério, organização, função e aquisição. Do ponto de vista psicológico (VIGOTSKI, 2009), um conceito está relacionado a uma estrutura, é geral, abstrato, sistemático e se expressa simbolicamente. Articulando tais concepções, elaboramos a síntese teórica que se segue, a qual fundamentará a obtenção de nossos resultados, constituindo categorias de análise.

O **invariante** de um conceito diz respeito ao conhecimento daquilo que não muda de um objeto para outro que esteja sob o mesmo conceito e é o que garante a sua universalidade. O aspecto invariante é entendido, de modo geral, conforme duas acepções: uniformidade e estabilidade. Um invariante uniforme é constituído por propriedades que se aplicam a todos os membros de uma categoria. De outro modo, um invariante estável é constituído por atributos dos objetos sob um mesmo conceito que não mudam com qualquer elemento contextual. (HARDY-VALLÉE, 2013). Podemos, ainda, considerar um invariante uniforme e estável.

Na teoria histórico-cultural, o invariante corresponde a uma estrutura psicológica, de modo que a aprendizagem de um conceito requer a formação de uma estrutura vinculada a ele, bem como o aprimoramento de estruturas já existentes. Neste sentido, podemos inferir que Vigotski defende uma concepção de aprendizagem como um processo estrutural e conscientizado, em que a aprendizagem não somente abarca e impulsiona o desenvolvimento, mas também o supera, aumentando suas possibilidades. Sobre a relação entre a formação de estruturas e aprendizagem, ele afirma:

Uma vez que o processo de formação de estruturas é reconhecido como processo primário que não surge como decorrência, mas é premissa de qualquer aprendizagem, esta adquire desde o início um caráter estrutural consciente nessa nova teoria. A característica principal de toda estrutura é a sua independência em relação aos seus elementos constituintes, ao material concreto de que se forma, bem como a possibilidade de ser estendida a qualquer outro material. [...] se aprendemos, digamos, um novo método de pensamento, um novo tipo de estruturas, isto nos dá a possibilidade não só de desenvolver a mesma atividade que fora objeto de aprendizagem imediata, mas nos dá muito mais: dá a possibilidade de ir além dos limites daqueles resultados imediatos a que a aprendizagem conduziu. (VIGOTSKI, 2009, p. 303)

Sendo assim, é essa estrutura que vai sendo formada e aperfeiçoada que nos permite conceber vários itens abarcados sob um mesmo conceito, pois essa consciência é transferível entre situações relativamente diferentes.

O invariante do quantum de uma grandeza tem como invariante a descontinuidade entre os valores da grandeza, independentemente de qual seja a grandeza: se seu valor é descontínuo, discreto, a grandeza é dita quantizada.

O conceito de dualidade comportamental de um sistema tem como invariante a possibilidade do sistema poder ser analisado como onda ou como partícula, ou seja: é possível aplicar o modelo de partícula para explicar algumas situações do sistema e o modelo ondulatório em para explicar outras. O modelo a ser aplicado não pode ser previsto, de modo que, a dualidade é considerada como uma possibilidade para todo sistema quântico, mesmo que não tenha sido empregada para explicar o comportamento de todos os sistemas quânticos. Assim, o invariante da dualidade comportamental é estável e uniforme.

Do ponto de vista da concepção linguística, aprendemos o conteúdo de uma expressão — quantum de uma grandeza, dualidade onda-partícula — quando compreendemos os enunciados em que a expressão intervém de maneira correta (HARDY-VALLÉE, 2013). Neste sentido, fica estabelecido na linguagem o conjunto de regras de inferências que a expressão possibilita, juntamente com sua significação, e apenas quando o indivíduo adquire esta gramática

conceitual, pode-se atribuir a ele a posse do conceito. Psicologicamente, tal aprendizagem corresponde à formação de um conceito espontâneo.

De acordo com a teoria histórico-cultural, o pensamento conceitual e o verbal estão intrinsecamente relacionados, de modo que o primeiro depende do segundo, sendo o emprego da expressão linguística como signo mediador para a resolução de problemas o principal aspecto do processo de formação conceitual (VIGOTSKI, 2009). Sendo o conceito, em nível psicológico, acima de tudo, uma generalização, podemos então entender que o processo de construção do conceito científico se inicia pela identificação consciente do seu invariante, das características comuns a todos os objetos/eventos/fenômenos sob um mesmo conceito. Logo, pela análise da linguagem empregada em diversas situações de sala de aula e avaliações pretendemos identificar indícios da posse ou não dos conceitos estudados, pelos indivíduos alvos desta pesquisa.

O **critério** do conceito constitui uma regra que determina a inclusão de uma coisa (um conteúdo) numa categoria (o conceito). Hardy-Vallée aponta para a possibilidade de duas formas de categorização: o critério fregiano, que implica a necessidade de condições necessárias e suficientes para a inclusão numa categoria, e o critério analógico, que categoriza a partir de semelhanças entre as coisas pertencentes a uma mesma categoria.

Admitimos que a ideia de que estabelecer um critério fregiano para o conceito de dualidade é problemática, uma vez que impõe rigorosamente a necessidade de um invariante sem ambiguidade definicional.

Por outro lado, o critério analógico permite que entendamos o conceito a partir de uma rede de semelhanças entre a coisa considerada e outras incluídas sob uma mesma categoria. Isto nos faz compreender, que o critério para atribuir dualidade ao átomo de hidrogênio foi por analogia de comportamento com outros sistemas quânticos — o fóton, o elétron — que, por serem quânticos, são semelhantes — entendendo semelhança como a existência de pelo menos uma propriedade em comum e pelo menos uma diferente entre as coisas que se encontram em comparação. De modo análogo, o conceito de quantum de uma grandeza pode ser atribuído a várias grandezas que exibem valores descontínuos.

Este é um quesito em que se diferenciam os conceitos espontâneos dos científicos. Primeiramente a diferença se dá pelo início do processo de aquisição do conceito espontâneo, o qual é caracterizado por ser de natureza indutiva, em que os conceitos são desenvolvidos a partir das suas propriedades perceptivas ou funcionais. Além disso, não há a necessidade, pelo

menos num primeiro momento de aprendizagem do conceito, de organizar o conjunto das relações sistemáticas entre os diversos conceitos espontâneos (SCHROEDER, 2007).

Conforme citado anteriormente, partindo-se do princípio de que o conceito é uma generalização, podemos dizer que é pela percepção do seu invariante/formação de estruturas que se dá o início do processo de aquisição do mesmo pelo indivíduo. Tal processo tem continuidade no contexto escolar — portanto, para os conceitos científicos — à medida que o estudante, tendo percebido as características comuns a todos os objetos abarcados pelo conceito, passa a identificar também características secundárias, as que variam dentre esses objetos, e ao utilizar a linguagem para expressar o pensamento conceitual, ressalta as características essenciais, ao passo que descarta características que sejam irrelevantes (SCHROEDER, 2007). Dentro deste processo, deve ser objetivo da educação escolar que o indivíduo nesse estágio possa relacionar o novo conceito a outros já adquiridos, levando então a uma organização sistemática de conceitos científicos.

Organização. A aparentemente natural tendência humana de organizar os conhecimentos em relações sistemáticas leva-nos a entender que a posse de um conceito deve incluir, também o conhecimento de outros conceitos com os quais ele se relaciona, de modo que obter um conhecimento envolve entender tanto o conceito em si, quanto o conjunto das relações entre este e os demais. De fato, sendo os conceitos generalizações, em sua essência devem servir para nos levar além da percepção imediata da realidade. Portanto, qualquer operação intelectual mediante o uso de conceitos — definição, comparação, discriminação, estabelecimento de relações, etc. — requer o estabelecimento de vínculos de dependência entre o objeto, o conceito e a realidade restante. Vigotski ainda afirma que “a própria natureza de cada conceito particular já pressupõe existência de um determinado sistema de conceitos, fora do qual ele não pode existir.” (VIGOTSKI, 2009, p. 359).

A importância do sistema de conceitos é tal que sem sua existência ficaríamos restritos aos vínculos diretos — empíricos — entre os objetos, perdendo as capacidades de abstração e de generalização, fundamento básico do conceito. Por sua vez, abstração e generalização são essenciais ao entendimento da dualidade onda-partícula, uma vez que é um conceito que se aplica a um modelo proposto de constituição da matéria e do seu comportamento e não necessariamente a objetos diretamente observáveis. Somente dentro de sistemas conceituais temos os vínculos supraempíricos necessários ao entendimento destes conceitos.

Hardy-Vallée aponta para a organização dos conceitos de acordo com uma estrutura vertical, em que conceitos mais gerais contém outros menos gerais e estes, por sua vez contém

conceitos que vão se tornando cada vez menos gerais e mais específicos. Há também uma estrutura horizontal, em que vários conceitos de mesmo nível de generalidade ocupam um mesmo patamar dentro do sistema de organização conceitual.

Vigotski, por sua vez, utiliza uma organização dos sistemas conceituais semelhante, uma metáfora com os conceitos geográficos de longitude — caracteriza as relações do conceito com o objeto, o ponto de sua aplicação a um determinado ponto da realidade; e latitude — grau de representação do concreto e do abstrato em cada conceito. Sobre a latitude e longitude do conceito, Vigotski ainda afirma que:

[...] elas devem conter o entroncamento de todas as relações de generalidade existentes no campo de dado conceito nos planos tanto horizontal quanto vertical, isto é, tanto em relação aos conceitos subordinados quanto aos superiores e inferiores pelo grau de generalidade. Chamamos de medida de generalidade desse conceito esse lugar do conceito no sistema de todos os conceitos, determinados pelas suas longitude e latitude, esse entroncamento de relações com outros conceitos contido na concepção do próprio conceito. (VIGOTSKI, 2009, p. 365)

A fim de visualizarmos mais claramente esta organização sistemática entre conceitos, usamos as definições de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula apresentados previamente neste texto, para desenvolver os mapas conceituais a seguir (Figuras 02 e 03)¹¹.

Podemos concluir de tais ideias de organização dos conceitos, que o pensamento conceitual, como forma superior de atividade cognitiva — comparada a atividades menos complexas como percepção e memória — se dá por meio da apreensão do grau de generalidade dos conceitos dentro de um dado sistema conceitual, bem como da sua relação com o objeto e/ou com a realidade, respectivamente, suas relações verticais/longitude e horizontais/latitude.

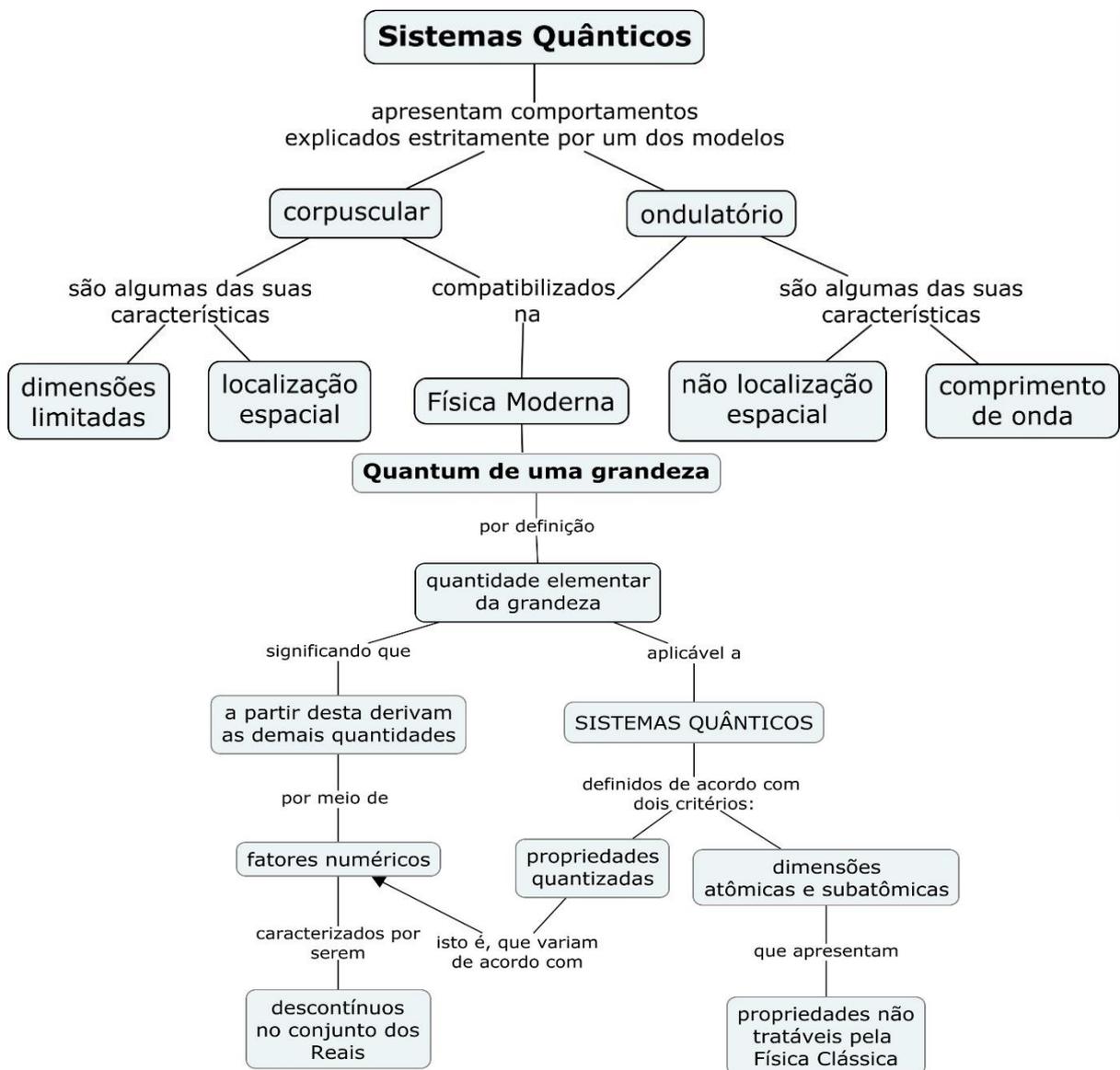
¹¹ Note-se que, nesses mapas, a organização baseou-se na contiguidade conceitual, ou seja: os conceitos aparecem conectados àqueles diretamente relacionados, sem consideração dos níveis de abstração/concretude. Tal escolha se apoia no fato de que os mapas poderão servir como instrumentos para análise dos dados e decidimos não analisar a relação concreto/abstrato do pensamento dos estudantes. Ver Metodologia.

Figura 02 – Mapa conceitual: Organização sistemática do conceito quantum de uma grandeza

Fonte: Própria autora (2017)

Assim justifica-se o fato de que nesta pesquisa buscamos nas avaliações escritas, evidências de que houve aprendizagem dos conceitos estudados mediante seu uso, associado ao sistema conceitual, na resolução de problemas. Consideramos que nesta situação o indivíduo deve elaborar sentenças que contenham palavras-chaves e uma organização lógica capaz de exprimir a articulação de conceitos que se dá internamente no seu pensamento.

Figura 03 – Mapa conceitual: Organização sistemática do conceito de dualidade onda-partícula



Fonte: Própria autora (2017)

No entanto, dada a impossibilidade de termos acesso direto ao pensamento do estudante que se depara no ambiente escolar com um conceito científico novo, podemos apenas inferir

sobre seu grau de apreensão conceitual indiretamente, por meio da linguagem falada e, principalmente no nosso caso, escrita. Isto significa que a ideia, antes mediada por significados a nível do pensamento, agora precisa ser externada pelo indivíduo através de signos/ palavras, o que causa necessariamente uma discrepância entre o pensamento e a linguagem.

O aspecto **função** do conceito diz respeito à questão: para que serve o conceito? Hardy-Vallée aponta para a existência de duas classes de função, a saber, a metafísica: determina a natureza da coisa; especifica a intensão e extensão reais; é normativa, indicando o que deve ser o caso realmente para que uma coisa caia sob um conceito; e determina o conteúdo semântico. E a epistemológica: determina a maneira como o indivíduo conhece a coisa; especifica a intensão e extensão a partir dos agentes; é descritiva, indicando o que deve ser o caso, para o indivíduo, para que uma coisa caia sob um conceito; e determina o conteúdo psicológico, ou seja os processos cognitivos em ação no uso do conceito.

Ao descrever a função epistemológica do conceito, o autor afirma que “os conceitos, sendo instâncias de categorização, de aprendizagem, de memorização e de arbitragem modal, nos permitem conhecer o mundo” (HARDY-VALLEÉ, 2013, p. 101). A partir do momento em que se adquire um conceito, o mesmo instala-se na memória — isto é um processo, mais ou menos longo, a depender do sujeito — e possibilita ao indivíduo recordar e organizar os conhecimentos mais facilmente, a partir da combinação de conceitos elementares. Indo mais além, a demonstração pelo indivíduo de que o conceito foi adquirido se dá a partir do momento em que ele apresenta a capacidade de sustentar ou rejeitar afirmações a partir de seu conteúdo conceitual.

A função epistemológica do conceito também pode ser observada no indivíduo mediante inferências, em que se demonstra a capacidade de realizar transições entre ideias ou representações — uma estrutura psicológica pode ser transferida para situações diferentes daquela em que foi formada — a partir de uma determinada regra. Tais inferências se revelam basicamente sob a forma de dedução: aplicação de conhecimentos a um caso e dele tirar conclusões; abdução: a partir de um caso, encontra-se uma regra; e indução: passagem do particular ao universal (HARDY-VALLEÉ, 2013).

A dualidade não descreve a realidade do mundo, mas, ajuda a agir sobre o mesmo e a explicá-lo parcialmente, mesmo sem estabelecer sua realidade. A base para tal afirmativa é a impossibilidade de unificar partícula e onda numa descrição, porque possuem características excludentes:

(a) A partícula é limitada em tamanho, ao passo que a onda não o é. Por isso, um ente não pode ser espacialmente limitado e ilimitado, simultaneamente.

(b) Partículas materiais não podem ocupar o mesmo volume, ao passo que, ondas, materiais ou imateriais, assim como entidades discretas imateriais, podem ocupar o mesmo volume. Por isso, um ente material não pode ocupar e não ocupar o mesmo volume, simultaneamente.

Portanto, a dualidade serve à função epistemológica como um instrumento para explicar e agir sobre a realidade, embora seja uma descrição ficcional dos sistemas quânticos.

Analogamente, o quantum de uma grandeza possui função epistemológica, e não, metafísica: descrevemos o mundo submicroscópico como formado por sistemas que apresentam propriedades com valores descontínuos, porém, tais propriedades são criações humanas, interpretações acerca do mundo, que não podem ser consideradas absolutamente verdadeiras no sentido de correspondência com a realidade.

Há ainda um caráter linguístico dentro da função epistemológica do conceito que está relacionado a dois aspectos: comunicação e significação. Segundo o autor:

[...] comunicar exige a capacidade de produzir e de compreender enunciados de maneira eficaz. [...] Comunicar seria impossível sem o conhecimento das relações semânticas que os conceitos nos fornecem: sinonímia, antonímia, tradução ou implicação. (HARDY-VALLÉE, 2013, p. 104-105)

Para além disto, a comunicação constitui-se talvez numa etapa final do processo de aquisição do conceito que, de acordo com a teoria histórico-cultural, inicia-se na motivação do indivíduo para mobilização de suas funções intelectuais básicas de pensamento e linguagem interior até o emprego funcional do signo/palavra orientado pela atividade de resolução de problemas.

Aquisição e formato. Por se tratar de uma representação das propriedades de todos os elementos de uma categoria, e não de um particular, o conceito é um universal abstrato. Este entendimento filosófico do que vem a ser o conceito necessariamente leva à conclusão de que “possuir um conceito é possuir uma espécie de abstração que se aplica a situações concretas [...]” (HARDY-VALLÉE, 2013, p. 78).

Concordamos com esta ideia de conteúdo linguístico do conceito, mesmo porque está de acordo com os outros aspectos do conceito segundo Hardy-Vallée e também com as ideias que destacamos da teoria histórico-cultural. De fato, para se adquirir os conceitos de quantum de

uma grandeza e dualidade onda-partícula é necessário que o estudante esteja familiarizado com a linguagem científica da física e especialmente da física quântica. Algumas palavras específicas fazem parte deste vocabulário e ao mesmo tempo constituem conceitos que são adquiridos por meio de outras palavras e podemos considerar que este é um processo em que se adquire os conceitos citados a partir do aprendizado da linguagem da ciência física.

Por outro lado, os elementos componentes do quantum e da dualidade são abstratos, por serem idealizados, porém servem a explicações de fatos empíricos, como a corrente elétrica produzida durante o efeito fotoelétrico ou as figuras de interferência da luz.

A partir de tal discussão sobre os aspectos constituintes do conceito pode-se concluir que a investigação sobre a aquisição dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula deve analisar a linguagem empregada na aplicação deste conceito em determinados contextos, quer esta utilização esteja adequada cientificamente, quer não. Tal análise deve identificar por diferentes meios — participação em sala, resolução de exercícios, respostas de avaliações — se o indivíduo entende o conceito de dualidade onda-partícula dentro das relações sistemáticas da qual faz parte e se sabe usar a linguagem científica adequadamente frente à necessidade de aplicar tais conceitos na resolução de situações-problema.

Da discussão sobre o desenvolvimento dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula no âmbito na física quântica, bem como, do entendimento dos aspectos que constituem estes conceitos de acordo com as principais ideias de Hardy-Vallée e Vigotski, podemos delimitar as categorias que utilizaremos na análise da linguagem dos estudantes no emprego deste conceito e de outros relacionados no contexto da disciplina Química Quântica I. Tais categorias são apresentadas no quadro 01 a seguir.

Quadro 01 - O conceito de conceito: Hardy-Vallée, Vigotski, o quantum de uma grandeza e a dualidade onda-partícula.

ASPECTOS DO CONCEITO (HARDY-VALLÉE)	DEFINIÇÃO	RELAÇÃO COM A TEORIA HISTÓRICO-CULTURAL (VIGOTSKI)	RELAÇÃO COM O CONCEITO DE QUANTUM	RELAÇÃO COM A DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA
INVARIANTE	Característica imutável dos objetos sob um mesmo conceito. Linguisticamente corresponde ao termo.	Corresponde a estruturas psicológicas.	Existe um ou mais termo(s) e uma estrutura psicológica vinculados ao conceito.	
CRITÉRIO	Regra que determina a inclusão de uma coisa (um conteúdo) numa categoria (o conceito).	Elementos do sistema conceitual	Que a grandeza tenha quantidade elementar a partir da qual as demais são derivadas.	Que o sistema seja quântico, de modo que possa ser analisado como onda ou como partícula.
ORGANIZAÇÃO	Os conceitos estão organizados em sistemas.	O pensamento conceitual se dá por meio da apreensão do grau de generalidade dos conceitos dentro de um dado sistema conceitual, bem como da sua relação com o objeto e/ou com a realidade.	Ver figura 02 (mapa conceitual, p.37)	Ver figura 03 (mapa conceitual, p.38)
FUNÇÃO	De natureza epistemológica: determina a maneira como o indivíduo conhece a coisa; especifica a intensão e extensão a partir dos agentes; determina os processos cognitivos em ação no uso do conceito.	O conceito é um aglutinador de diversas funções psicológicas que possibilitam ao ser humano interagir com a realidade.	Os conceitos servem à função epistemológica como um instrumento para explicar e agir sobre a realidade.	
AQUISIÇÃO E FORMATO	Se verifica externamente a aquisição pelo emprego da linguagem: explicitar, empregar e justificar o emprego. O conceito é uma entidade linguística, logo não tem formato representacional.	Internamente, a aquisição se dá pela formação das estruturas psicológicas que propiciam a aprendizagem. De natureza psicológica-linguística.	Formato: Racional Aquisição: De modo abstrato, por meio da linguagem, vinculando termo e significado.	
OBJETIVO DE PESQUISA:				
Investigar como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum e dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico				

Fonte: própria autora (2017)

2 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

2.1 DELIMITANDO O TIPO DE INVESTIGAÇÃO

Consideramos que esta pesquisa é de caráter empírico explicativo, fundamentado, em termos do delineamento metodológico, no interacionismo simbólico, cuja visão ontológica aponta para o entendimento de que os significados surgem e podem ser modificados a partir da interação social (CROTTY, 1998). Tendo em vista que esta pesquisa busca investigar como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum e dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico, está em perfeito acordo com o paradigma interacionista, que aponta para a “compreensão do modo como os indivíduos interpretam os objetos e as outras pessoas com as quais interagem e como tal processo conduz o comportamento individual em situações específicas” (CARVALHO; BORGES; REGO, 2010, p. 148).

Tal paradigma baseia-se em três aspectos fundamentais: o ser humano interage com os objetos e situações da vida social à base dos significados que tais coisas têm para ele; o significado das coisas surge da interação social entre o indivíduo e seus pares, ou seja, a partir da apropriação cultural e; a partir da interação do indivíduo com novas situações sociais e objetos, estes significados são interpretados e podem ser modificados (CARVALHO; BORGES; REGO, 2010). Sendo assim, o mundo, ou a sociedade humana, é entendido a partir da interação entre as pessoas que constituem dos diferentes grupos sociais (CROTTY, 1998). A ideia de que a apropriação cultural produz significados para o indivíduo é fundamental no delineamento desta pesquisa, pois a partir deste princípio analisaremos a aprendizagem de conceitos em sala de aula, ambiente este em que se promove a formação de novos significados pelos estudantes a partir da interação social, bem como o grau de aquisição desses novos significados.

Também como fundamentação teórica para a compreensão do processo de aprendizagem, esta pesquisa utiliza a teoria histórico-cultural, estando aqui em ressonância com o paradigma interacionista simbólico. Esta associação teórica é possível uma vez que também a teoria histórico-cultural considera que a interação social promove a apreensão e modificação de conceitos (significados, no interacionismo) pelo indivíduo.

De acordo com a teoria histórico-cultural, a função da escola é contribuir para o desenvolvimento das funções psicológicas superiores, de origem sócio-cultural, que são específicas do comportamento humano (SFORNI, 2004). Neste sentido, o papel da educação escolar envolve assegurar que o aluno desenvolva capacidades psicológicas que vão além das capacidades já amadurecidas, e este processo se dá, em nível escolar, pela aquisição dos conceitos científicos ensinados (VIGOTSKI, 2009). Esta aquisição se dá a partir do processo de internalização do conceito, em que o sujeito reconstrói internamente uma atividade externa. As expressões empregadas pelo sujeito no uso da linguagem, tanto verbal como não verbal, poderão dar indícios de como o desenvolvimento do conceito acontece entre os indivíduos no contexto em estudo.

Delimitando mais o tipo de pesquisa, podemos enquadrá-la como uma investigação qualitativa, pois se enquadra nas características básicas descritas por Bogdan e Biklen (1994): ambiente natural como fonte de dados — em nosso caso, a sala de aula; predominância do caráter descritivo da situação estudada; foco no processo, mais do que simplesmente nos resultados finais; análise indutiva dos dados — no sentido de que os dados conduzem a categorias não previamente estabelecidas; e a ênfase no significado, a perspectiva dos participantes em relação ao tema abordado.

Quanto ao caminho metodológico — que vai da observação à análise dos dados — este é claramente identificado quando se utiliza o paradigma interacionista para fins de pesquisa. Uma vez que se pressupõe o foco de pesquisa voltado para o entendimento da realidade a partir da experiência empírica, a metodologia aplicada deve distanciar-se dos métodos quantitativos baseados apenas na técnica e na matematização dos objetos e relações humanas. De acordo com Blumer, citado por Crotty (1998), a metodologia aplicada deve ser baseada em seis aspectos básicos, fundamentais à pesquisa empírica, a saber:

a) O referencial teórico possibilita uma concepção prévia do conjunto de objetos a ser estudado, pois são estas concepções que determinam o problema de pesquisa, bem como, os dados que devem ser analisados e as premissas que caracterizam o objeto de estudo. Neste caso, como já pontuado, partimos do referencial da teoria histórico-cultural articulado com a filosofia e, a partir destes, analisaremos a aquisição e o desenvolvimento dos conceitos de quantização e de dualidade onda-partícula.

b) O ato investigativo é baseado e orientado por questões e problemas elaborados previamente. Neste sentido as seguintes questões, oriundas de pesquisa anterior (RAMOS, 2008), nos orientaram: por que ensinar o modelo atômico quântico é importante — em diferentes níveis

— para estudantes do ensino médio e para professores em formação? Por que consideramos importante que estudantes de licenciatura — futuros professores — tenham bem fundamentados os conceitos básicos da Química Quântica? Quais os principais aspectos teóricos dos conceitos de quantum e de dualidade onda-partícula que contribuem para a compreensão do modelo atômico quântico como um todo?

c) A questão ou problema de estudo determina o terceiro item, que é a identificação dos dados a serem coletados e o meio necessário para tal. Uma vez que buscamos detectar indícios de aprendizagem pelos estudantes sobre determinados conceitos, é necessário registrar as expressões dos alunos durante as aulas, as dúvidas, questionamentos, bem como analisar suas respostas aos problemas propostos e avaliações. Tal coleta de dados foi realizada majoritariamente por meio de registro em vídeos e áudio das aulas ministradas e dos registros escritos dos alunos em suas avaliações.

d) O quarto aspecto envolve estabelecer relações entre os dados a partir das conexões identificadas entre os mesmos. Analisando-se os dados obtidos em sala de aula e nas respostas aos problemas propostos, buscaremos identificar indícios de aprendizagem no sentido já descrito, de tomada de consciência acerca dos conceitos.

e) O quinto aspecto diz respeito à interpretação dos resultados — neste passo o investigador, com base no seu referencial teórico, converge os dados empíricos em entendimento sobre a questão de pesquisa levantada previamente. Em nosso caso, observaremos pela linguagem empregada indícios de que o estudante conseguiu apreender os conceitos estudados, com base nas categorias que citamos anteriormente: seu invariante, critério, organização, função e formato.

f) Finalmente, o sexto aspecto é a aplicação dos conceitos que medeiam tanto a coleta de dados, como a interpretação dos mesmos, sendo este um aspecto que perpassa todos os demais.

2.2 O CONTEXTO DA PESQUISA: A DISCIPLINA, O PROFESSOR, O PLANEJAMENTO, AS TURMAS ENVOLVIDAS E A COLETA DE DADOS

Uma vez delimitado o tipo de investigação desenvolvida, passamos à descrição do contexto em que foi realizada a coleta de dados, justificando as escolhas que fizemos. Primeiramente, a escolha do professor e da disciplina.

Já foi indicado anteriormente que, dentre as possibilidades de contribuirmos para o ensino do modelo atômico quântico, optamos por trabalhar com a formação de professores, em nosso

caso, alunos da graduação em Química da UFBA. Considerando a matriz curricular da licenciatura em Química no período da pesquisa, existem duas disciplinas fundamentais nos estudos sobre os conceitos que abordamos: Química Geral III e Química Quântica I. Na escolha entre estas disciplinas, o aspecto mais relevante foi o professor ministrante, seguido do grau de profundidade possível no estudo desse tema.

Na proposta que defendemos, para que o ensino de aspectos do modelo atômico quântico fosse relevante na formação desses potenciais professores, seria necessário trabalhar com um professor que corroborasse do nosso ponto de vista. Isto é, que considerasse importante abordar aspectos históricos do desenvolvimento dessa teoria, que ressaltasse as relações conceituais e a importância de articular diferentes conceitos na resolução de problemas, que fomentasse a participação em sala de aula e a resolução de exercícios, que discutisse a escrita e a construção de uma argumentação e que abordasse os conceitos de quantização e de dualidade de maneira mais aprofundada, além da abordagem, às vezes, superficial de alguns livros didáticos. Sendo assim, a escolha mais adequada da disciplina a ser pesquisada foi a de Química Quântica I, devido ao fato de o professor da disciplina ser também o orientador desta pesquisa, naturalmente o professor mais familiarizado com essa abordagem proposta. Desse modo, não foi necessário primeiramente trabalhar a formação do professor colaborador, uma vez que o mesmo já realiza um planejamento e execução das aulas conforme esses aspectos que consideramos relevantes.

No Anexo A apresentamos o plano de curso, um planejamento da disciplina organizado pelo professor, no qual é possível identificar na metodologia de ensino e na seleção de conteúdos e objetivos específicos a maneira como aborda esse tema, valorizando o estabelecimento de relações entre conceitos e a construção de resoluções que demonstrem a apreensão dos mesmos pelos estudantes. Em destaque, temos no Quadro 02, a seguir, a seleção dos conteúdos e objetivos de ensino dos conceitos que fazem parte do nosso tema de pesquisa.

É possível observar nessa seleção, por exemplo, que já na introdução à disciplina, apresentam-se aspectos históricos do tema e essa abordagem se repete nos demais temas e aulas. Além disso, à medida que os conceitos são inseridos, ressaltam-se suas relações com os demais já trabalhados e com os fenômenos mais relevantes ao seu estudo. Destaca-se também o esclarecimento sobre analogias e termos empregados nos textos em geral e livros didáticos que muitas vezes geram dúvidas e/ou dificultam o entendimento dos estudantes.

Quadro 02 — Objetivos de ensino dos conceitos de quantum e de dualidade na disciplina Química Quântica

Tema/Aula	Objetivos de ensino
INTRODUÇÃO	Explicar o modelo atômico de orbitais como resultante de uma articulação de vários conceitos elaborados em um período de três décadas, aproximadamente.
QUANTUM DE UMA GRANDEZA; SISTEMA QUÂNTICO.	<p>Explicar o significado do termo quântico como descontínuo, discreto;</p> <p>Conceituar sistema quântico.</p> <p>Utilizar o conceito de sistema quântico para identificar se sistemas físico-químicos são quânticos ou não;</p> <p>Explicar a contribuição inicial de Planck para a teoria quântica como a introdução da descontinuidade de valores de energia em sistemas físicos e a proposição da quantidade elementar de energia — diferença entre os valores de energia descontínuos — como: $\epsilon = hv$.</p>
DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA DA RADIAÇÃO E DA MATÉRIA	<p>Descrever a experiência do efeito fotoelétrico e seus resultados;</p> <p>Explicar porque os resultados da experiência do efeito fotoelétrico não são explicáveis pelo modelo ondulatório da luz;</p> <p>Descrever o modelo quântico da luz proposto por Einstein;</p> <p>Explicar os resultados da experiência do efeito fotoelétrico pelo modelo quântico da luz;</p> <p>Conceituar quantum de energia;</p> <p>Explicar a denominação fóton para quantum de energia luminosa;</p> <p>Explicar caráter dual do fóton;</p> <p>Explicar analogia entre “pacote” ou corpúsculo de energia e fóton;</p> <p>Explicar comportamento ondulatório da radiação;</p> <p>Explicar relação entre matéria e energia (radiação) proposta por De Broglie;</p> <p>Deduzir relação entre momento linear e comprimento de onda e utilizá-la em cálculos;</p> <p>Explicar como foi evidenciado experimentalmente o comportamento ondulatório da matéria;</p> <p>Demonstrar, empregando a relação entre momento linear e comprimento de onda de um sistema, que a dualidade onda-partícula é característica dos sistemas quânticos;</p> <p>Reconhecer a dualidade onda-partícula como uma limitação do conhecimento humano acerca dos fenômenos naturais.</p>

Fonte: Plano de curso (ANEXO A)

No que diz respeito à escolha dos sujeitos da pesquisa, participaram os estudantes da disciplina Química Quântica I no semestre 2015.2, tendo sido analisados: (a) o comportamento em sala de aula e (b) as resoluções de questões por todos os 27 alunos. Quatro desses estudantes foram reprovados e repetiram a disciplina em 2016.1, com o mesmo professor, tendo tido seus trabalhos reanalisados.

A coleta de dados foi realizada por meio de filmagens das aulas e cópias digitais das resoluções de questões — avaliações e exercícios — dos alunos envolvidos.

O principal objetivo das filmagens foi registrar tanto a fala do professor, quanto a participação dos estudantes durante as aulas. Para tanto, geralmente dois ou três dos quatro alunos mestrandos/pesquisadores, que fazem parte deste projeto, se organizavam antes das aulas para prepararem as câmeras filmadoras e as posicionarem em locais estratégicos na sala de aula. Esses locais estratégicos foram escolhidos e testados de tal maneira que fossem coletadas as expressões do professor e dos estudantes com clareza de imagem e áudio. Inclusive, uma das filmadoras tinha uma base móvel sobre a qual um dos pesquisadores a movimentava conforme a posição dos participantes. Ao final das aulas, um dentre estes pesquisadores que operavam as câmeras se responsabilizava por descarregar os arquivos de vídeo e disponibilizá-los aos demais.

Conforme citado anteriormente, os responsáveis pelas filmagens estavam todo o tempo presentes em sala, mas, na medida do possível, não participaram diretamente nas aulas. No entanto, não podemos afirmar que a mera presença dos mesmos não influenciou na dinâmica da sala de aula, como acontece com qualquer observador/pesquisador de um determinado contexto.

2.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

O processo de análise dos dados de pesquisa foi fundamentado nas categorias que estabelecemos com base no referencial teórico. Isto é, as categorias que aparecem sintetizadas no Quadro 01. Uma vez que as estruturas psicológicas relativas aos conceitos de quantum de uma grandeza e dualidade onda-partícula não são passíveis de detecção, mas apenas, de inferência, a categoria **invariante do conceito** não foi empregada na análise. Consideramos que se há aquisição do conceito, a estrutura foi formada.

Também não empregamos a **função do conceito** na análise, pois as questões não foram dirigidas no sentido de sua identificação.

De modo geral, a análise foi feita do seguinte modo: buscamos nas questões 01, 02 e 03 das provas copiadas digitalmente por um conjunto de palavras-chaves fundamentais para o que consideramos respostas que atendem aos **critérios de inclusão de conteúdos nos conceitos** de nosso interesse; identificamos também, a **organização conceitual** que estabeleceram na resolução dos problemas propostos; com base nas palavras-chaves encontradas nas respostas dos estudantes, concluímos por sua **aquisição dos conceitos** em foco. Quanto à questão 04, por se tratar da aplicação de um conceito através da sua expressão física — a equação de De Broglie é derivada do conceito de dualidade desenvolvido pelo mesmo — e da realização de cálculos matemáticos por meio de relações entre equações, entendemos que a principal categoria para inferirmos sobre a aquisição conceitual seria a **organização**, expressa pela explicitação de tais relações.

Nos vídeos, analisamos as expressões do professor em busca de indícios de como sua fala pode ter influenciado em determinadas respostas, bem como a participação dos estudantes no momento da aula e como esse comportamento em sala pode ter influenciado no momento da avaliação; por fim, para o grupo de alunos repetentes, comparamos suas resoluções a uma mesma questão nos dois períodos consecutivos e identificamos as diferenças nos conceitos utilizados e nas relações estabelecidas.

Detalhando ainda mais o procedimento metodológico aplicado, temos a seguir os enunciados de cada questão da avaliação que analisamos, bem como a resolução proposta pelo professor da disciplina de acordo com os critérios necessários para apreensão do conceito. Com base nisso, indicamos também as palavras-chaves que procuramos para cada questão. Esses critérios aparecem organizados na forma de quadros explicativos no capítulo seguinte.

2.3.1 Questão 01

A questão 01 apresentada o seguinte enunciado:

Niels Bohr propôs um modelo atômico no qual a energia dos elétrons era calculada pela seguinte expressão: $E = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$, onde: m_e é a massa do elétron; e é a carga do elétron; ϵ_0 é a permissividade do vácuo; h é a constante de Planck e n é um número inteiro maior que zero. Com base nesta equação e considerando a definição de sistema quântico que adotamos na disciplina, explique se o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como um sistema quântico ou não.

Para esta questão, uma resolução que atenderia aos critérios esperados seria semelhante à seguinte:

Segundo a definição adotada no curso, um sistema é considerado como quântico se é microscópico e possui alguma propriedade cujos valores variam descontinuamente. O átomo é um sistema microscópico, por definição. Pela expressão da energia dos elétrons no modelo atômico de Bohr, vemos que seus valores são descontínuos: K , $K/4$, $K/9$ etc., onde $K = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$. Portanto, o modelo atômico de Bohr pode ser considerado um sistema quântico de acordo com a definição adotada.

Portanto, nessa questão buscamos pelos seguintes elementos: **definição de sistema quântico; valores de energia calculados pela expressão dada como critério para o átomo de Bohr ser incluído no conceito de sistema quântico ou, de modo inverso, como justificativa para o emprego do conceito de sistema quântico em relação ao átomo de Bohr; argumentação.**

2.3.2 Questão 02

A seguir, o enunciado da questão 02:

Explique como ocorre o processo de emissão um elétron por efeito fotoelétrico e porque a energia cinética (E_c) de um elétron emitido pode ser expressa pela equação: $E_c = hv - \phi$, informando o significado de cada termo desta equação.

Sua resolução mais apropriada ao nosso critério seria:

A emissão um elétron por efeito fotoelétrico ocorre quando um elétron absorve um fóton e adquire energia suficiente para vencer a atração do metal e, então, escapar da sua superfície. A energia de um fóton é hv ; a energia de atração do metal é ϕ . Logo, a energia cinética (E_c) de um elétron emitido será a diferença entre a energia recebida do fóton e a energia gasta para vencer a atração do metal: $E_c = hv - \phi$.

Com base nessa resolução, buscamos nas respostas os elementos: **descrição do processo de emissão; significado de hv e ϕ ; conservação da energia; argumentação.**

2.3.3 Questão 03

Seu enunciado é o que se segue:

De acordo com a teoria eletromagnética da luz (ondulatória), na experiência do efeito fotoelétrico, elétrons deveriam ser emitidos quando a luz apresentasse intensidade apropriada, independentemente do valor da sua frequência. Contudo, os resultados experimentais mostram que a emissão de elétrons depende da frequência da luz e independe da sua intensidade. Explique porque a emissão dos elétrons depende da frequência da luz e independe da sua intensidade.

A resolução que consideramos mais apropriada é semelhante a esta:

A emissão um elétron por efeito fotoelétrico ocorre quando um elétron absorve um fóton e adquire energia suficiente para vencer a atração do metal e, então, escapar da sua superfície. Portanto, a emissão do elétron depende da quantidade de energia que o mesmo recebe do fóton. Como a energia de um fóton é $h\nu$, onde ν é a frequência da luz, a emissão de elétrons depende da frequência da luz.

Um feixe de luz, segundo o modelo quântico, é constituído por fótons e sua intensidade é proporcional à quantidade de fótons que o constituem. Porém, a emissão é um processo que depende da energia recebida de um fóton por um elétron e ocorre com baixa ou alta intensidade de iluminação, contanto que a frequência da luz seja maior que um valor mínimo. Portanto, a energia do elétron não depende da quantidade total de fótons presentes no feixe de luz, ou seja: a emissão de cada elétron não depende da intensidade da luz incidente.

Portanto, buscamos pelos seguintes elementos nas respostas dos alunos: descrição do processo de emissão; energia do fóton e frequência; intensidade e quantidade de fótons; argumentação; correção da linguagem.

2.3.4 Questão 04

Concluindo a avaliação que analisamos, segue o enunciado da quarta questão:

Em um microscópio eletrônico os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial para atingir a energia cinética necessária à medição pretendida. Calcule a

diferença de potencial necessária para elétrons apresentarem comprimento de onda de $4,0 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$. Obs.: Um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo. A energia cinética de um elétron em unidade elétron-volt é calculada multiplicando sua carga pela diferença de potencial aplicada.

Uma resolução que atenderia aos critérios necessários seria semelhante a:

O comprimento de onda de um elétron pode ser calculado pela relação de de Broglie:

$$(1) p = h/\lambda, \text{ onde } p = mv.$$

O momento linear se relaciona com sua energia por

$$(2) E_c = mv^2/2 = p^2/2m.$$

Substituindo (1) em (2), obtemos: (3) $E_c = h^2/2m\lambda^2$.

A energia cinética do elétron se relaciona com a diferença de potencial necessária para acelerá-lo por $E_c = e\Delta V$, de modo que

$$(4) \Delta V = E_c/e.$$

Substituindo (3) em (4), encontramos a expressão para o cálculo de ΔV em função de λ :

$$(5) \Delta V = h^2/2em\lambda^2.$$

Tomando dos valores da tabela de dados, temos:

$$\Delta V = (6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s})^2 / 2 (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}) (9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) (4,0 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2$$

$$\Delta V = 6,626^2 \cdot 10^{-68} / (2 \times 1,602 \times 9,109 \times 16,0) \cdot 10^{-72} \text{ J}^2 \text{ s}^2 / \text{C kg m}^2$$

$$\Delta V = (43,90 / 467,0) \cdot 10^4 \text{ J}^2 \text{ s}^2 / \text{C kg m}^2$$

$$\Delta V = 9,400 \cdot 10^2 \text{ J}^2 \text{ s}^2 / \text{C kg m}^2$$

Como $1 \text{ J} = 1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$ e $1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}$, então:

$$\Delta V = 9,400 \cdot 10^2 \text{ J/C} = 9,400 \cdot 6,242 \cdot 10^{20} \text{ eV/C}$$

ou

$$\Delta V = 58,67 \cdot 10^{20} \text{ V}$$

Nesta questão buscaremos identificar nas respostas os elementos: **relação de de Broglie; relação entre E_c e voltagem; argumentação.**

Apresentamos no capítulo a seguir os resultados, obtidos da aplicação dessa metodologia, em que discutimos a aquisição dos conceitos estudados a partir das resoluções dos alunos a tais questões, tendo como fundamentação nosso referencial teórico.

2.3.5 Alunos repetentes

Identificamos que, dentre os estudantes desse grupo, quatro pessoas foram reprovadas e voltaram a cursar a disciplina logo no período seguinte, 2016.1. De acordo com o mesmo código que utilizamos para identificar os alunos que realizaram a primeira avaliação no período 2015.2, esses alunos são os identificados pelos números 02, 07, 08 e 09. Buscamos comparar suas resoluções a uma mesma questão nos dois períodos consecutivos e identificamos as diferenças nos conceitos utilizados e nas relações estabelecidas.

Começando pelo aluno 02, e fizemos da mesma forma com os demais, buscamos em sua primeira avaliação do período 2015.2 pela definição de sistema quântico aplicada ao modelo atômico de Bohr requerida na primeira questão, uma vez que esta mesma definição foi solicitada em avaliação no semestre seguinte. A fim de estabelecermos a comparação no desenvolvimento conceitual de cada aluno nos dois períodos, construímos mapas conceituais a partir destas respostas, de modo que a visualização da organização empregada possa nos levar a inferências sobre sua aprendizagem, bem como sobre as implicações para o ensino resultantes da nossa análise.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 GRAVAÇÕES

Previamente à execução da coleta e análise dos dados, foi planejado que as aulas seriam ministradas de modo tal que a participação dos alunos fosse incentivada e efetiva, de modo que suas falas seriam mais um conjunto de dados a contribuir para esta pesquisa. No entanto, não foi esse o resultado obtido quanto a este aspecto.

Salientamos que o professor da disciplina, desde a aula introdutória ao curso, destacou a importância da participação dos alunos com dúvidas, curiosidades e comentários, não somente para contribuir com esta pesquisa, mas como um canal para proporcionar uma aprendizagem em sala de aula mais proveitosa, resultando em resoluções de exercícios mais fundamentadas e consequentemente, na aquisição efetiva dos conceitos estudados. Observamos esse aspecto na seguinte fala¹² do professor na aula introdutória ao curso:

Professor: É importante que vocês cheguem pontualmente para participar da aula toda, fiquem até o fim, prestando atenção, verificando o que estão aprendendo, interrompendo quando não tiverem entendendo, certo? Perguntando...muita gente assiste à aula e não pergunta nada, o professor aqui fica sem saber se tá entendendo ou não tá entendendo. Esse primeiro entendimento é importante, mas ele não é suficiente para você saber explicar, então é preciso entender, estudar, construir um resumo daquilo que tá estudando com suas palavras e usar essas ideias que você conseguiu resumir para fazer os exercícios. Então os exercícios são importantes também, no sentido de que eles vão exigir que você saiba alguma coisa, de repente você percebe aquilo que não sabe e você volta para o texto e estuda novamente para poder responder. Eu peço a vocês que interrompam a aula em qualquer instante, com qualquer dúvida, qualquer dificuldade que estejam tendo, ou mesmo se estiver entendendo, mas esteja inseguro [...], participar das discussões [...], não precisa concordar com tudo o que estou falando, minha obrigação é tentar esclarecer, então vocês têm que perguntar sempre.

Apesar dos constantes incentivos à discussão dos conceitos em sala, na maioria das aulas, não houve participação significativa dos alunos a ponto de as gravações em vídeo comporem uma parte relevante do nosso conjunto de dados. Acreditamos que parte disso pode estar relacionado à falta de estudo fora da sala de aula, aliada à baixa resolução de exercícios. Não podemos descartar também os traços de personalidade de alguns alunos, como elevada timidez,

¹² As falas a todos envolvidos serão grafadas em itálico a fim de se destacar em relação ao texto

bem como a possibilidade de o fato das aulas serem gravadas ter intimidado a participação de outros.

No entanto, a mais provável causa da baixa participação dos alunos, foi a falta de uma metodologia de ensino que promovesse melhor essa participação. Verificamos que o modelo tradicional, mesmo com os constantes incentivos do professor, não foi eficaz neste quesito. Atividades em pequenos grupos, seguidas de debates e apresentações, são exemplos de metodologias que requerem necessariamente a fala do estudante, logo serviriam melhor a esta pesquisa como fonte de dados.

Sendo assim, ao longo da análise que se segue, recorreremos aos vídeos nos casos em que inferimos que a fala do professor possa ter influenciado diretamente em algum resultado, ao passo que as respostas dos estudantes à avaliação é nossa principal fonte de pesquisa.

3.2 RESPOSTAS ÀS AVALIAÇÕES EM 2015.2

Apresentamos no capítulo anterior os enunciados das questões da prova que analisamos, bem como as resoluções que relacionam adequadamente os critérios que consideramos necessários para aquisição dos conceitos empregados em cada uma. A partir desse ponto, relacionaremos nossa fundamentação teórica, o desenvolvimento histórico dos conceitos abordados e o estudo sobre o conceito e seu desenvolvimento conforme Hardy-Vallée (2013) e Vigotski (2009), a esses dados a fim de alcançarmos o objetivo desta pesquisa.

3.2.1 Questão 01

Apresentamos novamente o enunciado desta questão: *Niels Bohr propôs um modelo atômico no qual a energia dos elétrons era calculada pela seguinte expressão: $E = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$, onde: m_e é a massa do elétron; e é a carga do elétron; ϵ_0 é a permissividade do vácuo; h é a constante de Planck e n é um número inteiro maior que zero. Com base nesta equação e considerando a definição de sistema quântico que adotamos na disciplina, explique se o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como um sistema quântico ou não.*

De acordo com o texto trabalhado em sala de aula, intitulado **Quantum de uma grandeza e sistema quântico** (ANEXO B), o termo quantum de uma grandeza significa, no âmbito da teoria quântica, quantidade elementar da grandeza considerada, a partir da qual se constituem os demais valores da grandeza, por meio da multiplicação do seu valor por fatores numéricos

descontínuos no conjunto dos números reais. Por sua vez, o adjetivo quântico se refere ao quantum de uma grandeza. Portanto, um sistema microscópico que apresente alguma propriedade cujos valores sejam descontínuos e múltiplos de uma quantidade elementar pode ser caracterizado como um sistema quântico.

O reconhecimento do conceito de um sistema como quântico requer a aplicação dos critérios: (a) ser microscópico e (b) apresente alguma propriedade cujo valor seja descontínuo, o que exige a análise dos valores da propriedade empregando o conceito de quantum de uma grandeza. Sendo assim, as respostas à questão 01 se prestam como dados à nossa investigação.

No quadro 03 a seguir, temos a organização da análise das respostas dos alunos para a questão 01 da avaliação. Primeiramente, buscamos a explicitação dos critérios para identificação de um sistema como quântico, elemento essencial à resolução, uma vez que é um item requerido no enunciado. Estes critérios aparecem representados separadamente, pois foi observado que alguns alunos citaram um, mas não o outro. Em seguida, temos o uso da equação citada no enunciado como parte da justificativa para o emprego do conceito de sistema quântico em relação ao átomo de Bohr e um elemento básico de organização conceitual, pois é através da sua interpretação que o estudante pode relacionar corretamente o modelo de Bohr ao conceito de sistema quântico. Assim, tendo o estudante atendido aos critérios do conceito e apresentado a organização conceitual esperada, consideramos que sua resolução apresenta indícios de que houve aquisição do conceito estudado.

Por outro lado, à medida que fomos percorrendo os textos em busca das categorias para nossa análise, identificamos um grupo de elementos, comuns a alguns textos, que fogem aos critérios e/ou à organização estabelecidos. Esses fatores discordantes são indícios de que até o momento da realização dessa avaliação, em alguns alunos esses conceitos ainda não estavam plenamente desenvolvidos. Dentro deste grupo, os mais presentes itens foram: não justificar a característica microscópica do átomo de Bohr (**A1**); desconhecimento da sinonímia entre os adjetivos quântico, quantizado, descontínuo e discreto (**A2**); limitar a descontinuidade de um sistema quântico só à variação da energia (**A3**); apresentar a ideia de quantização como variação em valores discretos como números inteiros ou como pacotes (**A4**).

Em suma, estabelecemos que atender aos critérios do conceito, bem como, apresentar a organização conceitual esperada são indícios de *aquisição*, ao passo que apresentar ou não elementos que fogem ao esperado nos fornecem indícios sobre o *desenvolvimento* conceitual.

Quadro 03 — Análise das resoluções à Questão 1

QUESTÃO 1 - Sistemas Quânticos								
Estudantes	Critérios		Organização	Elementos que fogem ao critério e/ou organização				Aquisição
	Microscópico	Alguma propriedade quantizada	Equação	A1	A2	A3	A4	
01	X	X	X	X				X
02	X	X	X	X				X
03				X		X	X	
04	X	X	X	X			X	X
05	X	X		X		X		
06		X	X	X	X		X	
07	X			X		X	X	
08	X	X		X	X	X		
09	X	X		X			X	
10				X				
11		X		X	X	X		
12	X	X	X					X
13		X	X	X			X	
14	X	X	X	X				X
15	X	X	X					X
16	X	X		X	X			
17	X	X		X				
18	X	X		X	X	X		
19	X		X					
20	X	X				X	X	
21	-	-	-	-	-	-	-	-
22	X	X	X					X
23	X	X		X			X	
24		X	X	X				
25		X		X	X		X	
26	X	X	X		X			X
27	X	X			X			
%	73	85	46	73	31	27	35	31

Fonte: Própria autora (2017)

No que diz respeito ao item **critérios** pode-se notar que a maioria dos estudantes consegue corretamente identificar um sistema quântico como sendo microscópico (73%)¹³ **ou** tendo alguma propriedade quantizada (85%). Foi o caso, por exemplo, do aluno¹⁴ 19, que usa o critério *ser microscópico*, mas não apresenta claramente a ideia de propriedade descontínua:

Aluno 19 – Um sistema quântico é um sistema microscópico e descontínuo [...].

Observamos que o estudante tem a noção do fator descontinuidade, mas não demonstra clareza quanto à atribuição desta descontinuidade a alguma propriedade do sistema e não a este como um todo.

Já na resposta do aluno 13, observamos a ausência do critério *ser microscópico*:

Aluno 13 - Um sistema pode ser considerado quântico se pelo menos uma de suas propriedades variar discretamente. Em outras palavras esta propriedade não pode variar de maneira contínua, sendo permitido apenas valores discretos, múltiplos inteiros da quantidade elementar da propriedade.

Vale salientar nessa resposta a presença da ideia de variação conforme números inteiros, o que não faz parte do conceito de propriedade quântica, sua descontinuidade não está relacionada necessariamente a variações em números inteiros ou como múltiplos de um determinado valor, esta são apenas possibilidades. Discutiremos esse aspecto novamente mais à frente.

No entanto, essa porcentagem diminui quando consideramos a resposta mais completa, em que ambas as características devem ser citadas: o sistema quântico é microscópico e apresenta alguma propriedade quantizada (61%):

Aluno 01 – Um sistema quântico é um sistema microscópico que possui alguma propriedade cujos valores variem descontinuamente, ou seja: valores discretos.

Aparentemente, a presença da palavra quântico no termo a ser definido — sistema quântico — induz os estudantes a identificar a necessidade de haver alguma propriedade quantizada, mas não é o suficiente para que na mesma proporção ressaltem a importância de que o sistema seja também microscópico, no sentido de não diretamente sensível, como fizeram, por exemplo, os alunos 12 e 15 a partir de argumentações diferentes:

¹³ As porcentagens foram calculadas em relação aos 26 alunos que responderam à questão e não ao total de 27 alunos.

¹⁴ Trataremos todos os alunos no gênero masculino e identificados por números, a fim de preservar suas identidades.

Aluno 12 — [...] Na fórmula acima verificamos que é utilizada a massa e a carga do elétron, que são valores muito pequenos, indicando que trata-se de um sistema microscópico.

Aluno 15 — [...] como se trata de um modelo atômico, é um sistema microscópico.

Evidentemente, este resultado está intimamente relacionado ao problema de argumentação mais recorrente nas respostas: não explicar porque o átomo é microscópico (A1, presente em 73% das respostas).

Devido a este resultado de proporções elevadas, buscamos na gravação da fala do professor em sala de aula se este aspecto foi citado, muito embora seja válido salientar que tal definição completa aparece no texto **Quantum de uma grandeza e sistema quântico**, citado anteriormente, escrito e enviado a todos pelo professor, o qual também foi discutido em sala de aula.

Foi notado que, ao propor a solução de um problema muito semelhante ao desta questão da prova (questão 3 da lista de exercícios – ver Anexo C), o professor ressaltou mais a característica quântica do sistema comparada à microscópica:

Professor — Esse é um problema muito simples, tem poucas informações, então tem pouca coisa a relacionar e a gente tem que examinar então o que? Os valores que estão postos [...]. Examinando aqueles valores de energia e de momento angular o que é que eu vejo? Eu vejo que os valores de energia são descontínuos [...], o momento angular do mesmo modo [...]. Eu vejo também que esses valores são todos valores pequenos, aqui é da ordem de 10^{-9} , o valor da energia, e o valor do momento angular menor ainda 10^{-34} de ordem de grandeza.

Depois de explicar um pouco mais sobre argumentação e como construir uma resposta a um problema, o professor conclui com uma possível resposta à questão:

Professor (lendo a questão projetada no quadro) — Considerando que os valores de energia e de momento angular do átomo apresentado no enunciado são descontínuos e considerando que um sistema quântico possui propriedades cujos valores são descontínuos, concluo que o átomo é um sistema quântico.

Neste caso, é possível compreender que o professor demonstrava como construir uma resposta a partir de dados fornecidos no enunciado da questão, que apoiados numa garantia, deveriam resultar numa conclusão que solucionasse o problema. É possível que a maior parte dos estudantes tenha apreendido esta resposta específica, sem atentar para o fato de a questão

da avaliação indicava como garantia a definição, completa, de sistema quântico adotada na disciplina.

Também pode ter ocorrido que os estudantes não sentissem a necessidade de justificar as dimensões do modelo atômico de Bohr, dada a familiaridade com que utilizam o conceito de átomo em seus estudos de Química e o fato de estarem utilizando-o em uma disciplina de Química: afinal, entre químicos, todos devem saber que os átomos são microscópicos.

Ainda em relação a este primeiro item básico da nossa análise — identificação dos critérios necessários à definição do conceito — notamos também um grupo de respostas que apresentam um distanciamento do critério que consideramos adequado, caracterizadas pelo desconhecimento da sinonímia entre os adjetivos: quântico, quantizado, descontínuo e discreto (A2), presente em 31% das respostas. A principal forma como este problema aparece é na situação em que o estudante repete esses termos dentro da mesma definição, por exemplo:

Aluno 16 — Um sistema é considerado como quântico quando este é microscópico, possui propriedades que variam descontinuamente, valores discretos e é quantizado.

A resposta indica que o aluno desconhece a relação de sinonímia existente entre as expressões: *variavam descontinuamente; valores discretos; e quantizado*. Sua construção textual aponta para quatro características de um sistema quântico: ser microscópico; possuir propriedades que variam descontinuamente; possuir valores discretos; e ser quantizado.

Aluno 11 — Um sistema para ser considerado quântico deve possuir alguma propriedade com energia quantizada e que varie descontinuamente.

No caso conjunção *e*, aditiva, indica claramente a distinção entre energia quantizada e descontínua. A falta de identificação entre os significados de quântico, quantizado, descontínuo e discreto indica que os adjetivos quântico e quantizado possuem, para esses estudantes, significados diferentes de descontínuo e/ou discreto, sem que saibamos quais significados seriam. Portanto, tais estudantes não adquiram o conceito completo de quantum de uma grandeza.

A resposta do aluno 11 também indica também a presença de outro elemento que se distancia do critério para o conceito, presente em 27% das respostas: ao definir sistema quântico, limitar a descontinuidade à energia (A3). No caso deste, percebe-se que ao escrever *alguma propriedade com energia quantizada*, pelo fato de a energia já ser uma propriedade do sistema, houve uma confusão entre os termos energia e valor/variação, diferentemente de outras respostas que de fato limitam a quantização à energia do sistema:

Temos também neste sentido a resposta do aluno 05:

Aluno 05 — Um sistema quântico é definido como sistema microscópico que apresenta valores descontínuos de energia.

Estes casos apontam para uma possível deficiência na apreensão deste conceito por estes estudantes, uma vez que foi salientado pelo professor em sala de aula, bem como ressaltado nos textos indicados que outras propriedades podem ser quantizadas: o raio da órbita e o momento angular, no caso do modelo atômico de Bohr, por exemplo. A fim de ampliar a ideia do que é uma variação quantizada de uma propriedade, o professor sempre usa em sua fala, e explica o porquê, a expressão **quantum de uma grandeza**, exatamente para indicar o caráter geral do quantum e que esta característica não deveria se restringir à energia.

Ao incluirmos na análise o segundo elemento básico da nossa análise — apresentar uma organização conceitual tal que a equação fornecida seja utilizada para relacionar o átomo de Bohr ao conceito de sistema quântico — verifica-se que o número de respostas que atendem a esse item cai para 46%.

Houve também um equívoco de definição presente em 35% das respostas, que é a ideia de variação discreta sempre como números inteiros e até mesmo como pacotes (A4), como é possível observar nas respostas dos alunos 13 e 06 citadas anteriormente e nesta, do aluno 04:

Aluno 04 — Para um sistema ser considerado quântico, duas características este deve conter: ser microscópico e ter uma variação de valores discreta (pacotes) em uma dada propriedade.

Neste sentido, é bom salientar novamente a resolução da questão 03 da lista de exercícios, que o professor realizou em sala de aula. Os valores informados para energia, bem como, do momento angular do sistema citado, variam descontinuamente, porém não conforme números inteiros, por exemplo, a energia liberada varia de $21,8 \times 10^{-19} \text{ J}$ para $5,45 \times 10^{-19} \text{ J}$, uma variação na razão de 0,25.

Pelo visto, os dados indicados no enunciado do problema — a definição e a equação — não despertaram suficientemente a atenção dos estudantes de modo que os utilizassem na sua resolução. Nem mesmo a resolução prévia de questões consideradas semelhantes, presentes na lista de exercícios, aliada à possibilidade de resolver as provenientes dúvidas com o professor, colegas e textos, foi suficiente para estimular respostas adequadas por todos os estudantes.

Por outro lado, notamos no texto de apoio à disciplina (ANEXO B) uma informação que, devido a uma leitura superficial ou mal interpretada, pode ter influenciado nesta concepção

equivocada presente em algumas respostas, pois neste trecho afirma-se que “Planck elaborou um modelo para o corpo negro, no qual, suas paredes seriam constituídas por osciladores [...]. A energia de cada oscilador era um *múltiplo inteiro* de uma parte elementar de energia”. Neste sentido, podemos indicar que um destaque do professor para o fato de que esta limitação a números inteiros está relacionada especificamente ao modelo utilizado por Planck na elaboração de sua teoria, poderia proporcionar uma melhor compreensão sobre este aspecto.

Observa-se também que algumas respostas fogem totalmente do previsto para esta questão e/ou apresentam confusão entre diversos conteúdos citados pelo professor ou obtidos em leituras diversas. Os alunos 03 e 10, por exemplo, não apresentam quaisquer dos elementos básicos esperados para resolução da questão:

Aluno 03 — Com base nessa equação pode-se concluir que o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como um sistema quântico, pois Bohr utiliza variáveis corpusculares e variáveis ondulatórias, o que demonstra a dualidade do seu sistema. Bohr admitiu que as órbitas onde os elétrons estavam situados ao redor do núcleo eram quantizadas e que a energia de cada órbita só poderia assumir valores inteiros, múltiplos da energia do estado fundamental. Ele admite que a órbita é quantizada, pois não consegue explicar o fato dos elétrons não caírem no núcleo.

Aluno 10 — De modo a entender o comportamento dos elétrons no átomo, Bohr levou em consideração muitas teorias e uma delas foi a ideia de quantização de uma quantidade mensurável, a energia de um fóton. Assim, Bohr argumentou que talvez a energia não fosse a única quantidade que pudesse ser quantizada. Supôs que se uma partícula estivesse girando em órbitas circulares ao redor do núcleo, o seu momento angular poderia ser quantizado. Utilizou o átomo de hidrogênio para explicar sua teoria, chegando à conclusão que o momento angular tem as mesmas unidades da constante de Planck. E a energia do elétron poderia ser calculada por : $E = - \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$. Onde n é um número inteiro positivo, então os raios das órbitas dos elétrons no átomo só podem ter certos valores determinados por n , n é quantizado.

No caso destes alunos, suas respostas indicam que, pelo menos nesse primeiro momento, não houve aprendizagem suficiente do conceito de sistema quântico, pois em ambas os elementos mínimos de argumentação para uma resposta adequada não aparecem.

O aluno 03 apresenta afirmações que não condizem com o desenvolvimento dos conceitos estudados, como: “pois Bohr utiliza variáveis corpusculares e variáveis ondulatórias”. Primeiramente os adjetivos corpuscular e ondulatório não se referem a variáveis, entes

matemáticos que não têm em si comportamento físico, e sim a sistemas físicos e seus fenômenos. Na continuação desse trecho ele relaciona essa afirmação ao conceito de dualidade, ao escrever: “o que demonstra a dualidade do seu sistema”. Isto também não é verídico, uma vez que a ideia de dualidade onda-partícula é posterior ao modelo atômico de Bohr. Ao afirmar que “as órbitas onde os elétrons estavam situados ao redor do núcleo eram quantizadas”, novamente o aluno demonstra falta de compreensão do desenvolvimento destes conceitos. Falta a indicação de qual propriedade da órbita seria quantizada, Bohr fala que seriam quantizados seu raio, o momento angular do elétron na órbita e a diferença de energia entre órbitas, no entanto, o aluno não apresenta em sua resposta qualquer indício de que compreende a ideia que apenas algumas propriedades das órbitas no modelo atômico de Bohr seriam quantizadas, ao passo que outras não, por exemplo, a energia do elétron em órbita seria constante. Inclusive, sua frase seguinte ratifica esta afirmação que fazemos, de que não houve compreensão: “a energia de cada órbita só poderia assumir valores inteiros, múltiplos da energia do estado fundamental”, onde também aparece o erro conceitual de quantização necessariamente como variação em números inteiros.

Já o aluno 10 apresenta uma série de afirmações coerentes com o desenvolvimento dos conceitos, como a ideia de que Bohr buscou ampliar a aplicação da quantização para outras propriedades além da energia, que o momento angular do elétron em órbita seria também quantizado e que o átomo de hidrogênio foi o modelo em que ele aplicou sua teoria. Porém, ao concluir sua argumentação, o aluno apresenta uma construção equivocada de ideias, primeiramente apresentando a equação citada no enunciado – que diz respeito à energia total do átomo de hidrogênio – como sendo a energia do elétron e ao mesmo tempo interpretando-a em termos do raio da órbita, sendo que há uma equação específica proposta por Bohr para esta propriedade.

Por outro lado, se considerarmos as respostas completas, ou seja, em que o estudante define o sistema quântico como microscópico, tendo alguma propriedade com variação quantizada e que utiliza a equação fornecida para indicar que o átomo de Bohr atende a estes critérios a porcentagem é de 31%, isto é, apenas 8 (oito) alunos no grupo dos 26 que responderam à questão. Para estes alunos consideramos que houve o maior grau de aquisição do conceito, pois compreendem o grupo que apresentou em suas respostas os elementos que consideramos essenciais: os critérios e uma organização conceitual adequada.

Dentre os estudantes inclusos nesta parcela, destacamos uma das respostas que apresenta indícios de apreensão dos conceitos estudados e de construção adequada da argumentação,

baseada nos dados fornecidos no enunciado, apoiada na garantia da definição do conceito necessário e chegando a uma conclusão efetiva:

Aluno 12 — Um sistema, para ser considerado quântico, deve possuir duas características: ser microscópico e ter uma propriedade quantizada, ou seja, com valores discretos. A energia no modelo de Bohr é calculada pela expressão: $E = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$, em que apenas n não é uma constante e sim um número inteiro maior que zero. Deste modo, a energia não poderá ter qualquer valor, sendo assim uma propriedade quantizada. Como se trata de modelo atômico, é um sistema microscópico. Portanto, o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como sistema quântico.

Temos também a resposta do aluno 22:

De acordo com a definição, um sistema quântico deve ter dimensões microscópicas e possuir alguma propriedade com valores discretos, isto é, que variem descontinuamente. Com base na equação para energia dos elétrons proposta por Bohr, a energia do elétron depende de uma série de constantes, além do número “ n ”, que só varia em números inteiros e positivos. Portanto, podemos considerar que o modelo atômico de Bohr é um sistema quântico, pois ele tem dimensões microscópicas e tem uma variação discreta para o “ n ”.

Em conclusão a essa questão, fazendo uma análise geral da escrita dos textos, geralmente os estudantes que seguiram a argumentação ensinada pelo professor, utilizando os dados fornecidos no enunciado e usando uma definição completa do termo solicitado para chegar a uma conclusão correta da resolução, conseguiram construir textos breves, mas cujas informações são coerentes e coesas. Por outro lado, a aparente falta de compreensão dos termos empregados e do desenvolvimento de alguns conceitos, resultou em respostas que apresentavam uma série de informações incorretas e/ou desnecessárias, apresentada em textos relativamente longos, mas de fraca argumentação e baixas coerência e coesão textual.

Os resultados obtidos apontam para algumas modificações a serem realizadas no ensino do conceito de quantum de uma grandeza, visando sua aquisição de modo mais desenvolvido:

- I. Mostra-se necessário trabalhar melhor a articulação entre o emprego do conceito e sua justificativa, de modo a dar-lhe maior cientificidade. Em termos gerais, a justificativa se dá pela explicitação da característica específica do caso em foco que o vincula ao conceito. No caso do conceito de quantum de uma grandeza, a justificativa se dá pela demonstração de que os valores de alguma grandeza do sistema variam descontinuamente.

- II. Tornar mais explícito que sistemas quânticos são microscópicos (ou submicroscópicos), no sentido de serem não sensíveis, ou seja: inacessíveis pelos sentidos; sistemas macroscópicos, em geral, são tratados pelas teorias clássicas, nas quais, os valores das grandezas associadas variam continuamente.
- III. O item (a) remete à necessidade de se estabelecer mais fortemente a sinonímia entre os adjetivos quântico, quantizado, descontínuo e discreto.
- IV. É preciso chamar a atenção para o fato de que a quantização pode se referir a qualquer grandeza e que tais grandezas podem variar, de sistema para sistema.
- V. Demonstrar que a quantização não está vinculada, apenas, a números inteiros.
- VI. Metodologicamente, será preciso incrementar a discussão entre professor e estudantes, aumentando a quantidade de exercícios a serem resolvidos pelos estudantes e discutidos em sala de aula. Em vista da pouca participação dos estudantes, será necessário desenvolver as discussões de modo a estimulá-los à maior participação, o que não é fácil.

3.2.2 Questão 02

A segunda questão da avaliação é sobre o efeito fotoelétrico e tem o seguinte enunciado: *Explique como ocorre o processo de emissão um elétron por efeito fotoelétrico e porque a energia cinética (E_c) de um elétron emitido pode ser expressa pela equação: $E_c = h\nu - \phi$, informando o significado de cada termo desta equação.*

Apesar de efeito fotoelétrico não se configurar como um dos nossos conceitos de pesquisa, entendemos que se trata de um fenômeno a ser explicado teoricamente mediante a utilização do modelo corpuscular da luz, segundo o qual o fóton é uma partícula que representa um quantum de luz. Sendo assim, é possível atribuir a esta questão a categoria de análise *critério*, pois a resposta exige o conceito de quantum, relacionado ao modelo corpuscular da luz.

Neste caso, consideramos que o estudante deve apresentar em sua resolução: uma descrição do processo de emissão que inclua o conceito de fóton — próprio do modelo corpuscular/quântico da luz ; os significados dos termos $h\nu$ e ϕ ; bem como utilizar o princípio da conservação da energia na explicação da equação da energia cinética do elétron emitido. Entre os que se equivocaram na elaboração dessa organização conceitual, observamos três principais distorções: descrever/desenhar o experimento do circuito para definir o efeito

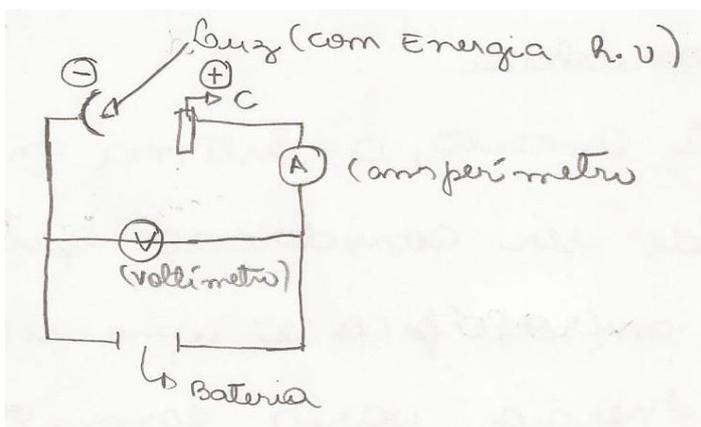
fotoelétrico (**B1**); uso do termo $h\nu$, energia do fóton, como energia do feixe de luz (**B2**); e confusão entre força e energia — no caso da função trabalho (**B3**).

O quadro 04 a seguir apresenta o resultado da análise das resoluções dos estudantes à questão 02, de acordo com esses elementos previstos. Assim como na questão anterior, àqueles que conseguiram apresentar o critério do conceito, neste caso, o efeito fotoelétrico como emissão de elétrons via interação com fótons, e apresentar a organização conceitual adequada para sua resolução, atribuímos o status de *aquisição* do conceito, ao passo que a presença de elementos que fogem ao critério e/ou à organização nos dá indícios sobre o processo desenvolvimento conceitual.

Nosso primeiro dado de análise — descrever o processo de emissão — indica que em praticamente todas as respostas houve algum tipo de descrição do efeito fotoelétrico como fenômeno de emissão de elétrons a partir da interação destes com partículas de luz (fótons).

Numa das respostas em que não houve tal descrição, o aluno limitou-se apenas a indicar os fatos experimentais relacionados ao exemplo do circuito para observação do efeito em questão:

Aluno 04 — *Para explicar como decorre o processo do efeito fotoelétrico é necessário montar um circuito que represente este fenômeno.*



Foi observado que quando a placa foi iluminada com uma luz de energia adequada havia um fluxo ordenado de elétrons medido pelo amperímetro (A). Foi observado que quanto maior a frequência da luz, maior era a velocidade. Finalmente, quanto maior a energia da luz incidida, maior será a energia cinética já que a função trabalho é característico de cada metal, logo uma constante.

Quadro 04 — Análise das resoluções à Questão 2

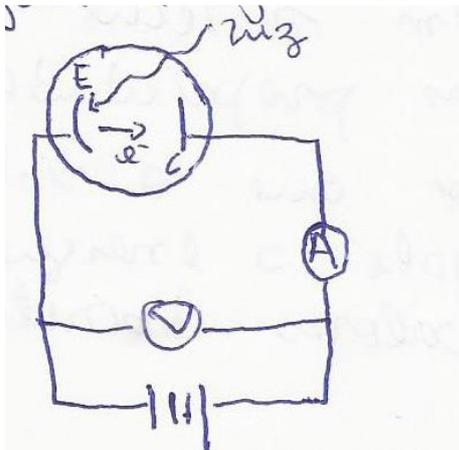
QUESTÃO 2 – Efeito Fotoelétrico									
Estudantes	Critério	Organização			Elementos que fogem ao critério e/ou organização			Aquisição	
		Emissão via fóton	Significados		Conservação da energia	B1	B2		B3
			h ν	Φ					
01	X	X	X	X				X	
02	X		X	X	X	X			
03	X	X	X						
04					X				
05	X	X	X	X				X	
06	X	X		X			X		
07	X						X		
08	X	X	X	X				X	
09					X	X	X		
10	X	X	X	X	X			X	
11	X		X	X	X	X			
12	X		X		X	X			
13	X	X	X	X				X	
14	X	X		X	X				
15	X	X	X	X				X	
16	X	X	X	X	X				
17	X		X	X	X				
18	X	X	X						
19	X	X	X						
20	X		X		X		X		
21	X	X		X	X				
22	X	X	X	X			X	X	
23	X	X							
24	X	X	X						
25	X		X	X					
26	X	X	X	X				X	
27	X	X		X					
%	93	67	70	63	41	15	18	30	

Fonte: Própria autora (2017)

Observamos nesta resposta que, quer os dados indicados estejam de acordo com o experimento, quer não, esta abordagem foge à proposta da questão, a qual visa entender o efeito fotoelétrico de maneira geral e não aplicada num determinado contexto.

Temos ainda o caso em que há a descrição do fenômeno, porém pelo uso de conceituações inadequadas, como na resposta do aluno 09:

Aluno 09 – *O experimento do efeito fotoelétrico é esquematizado da seguinte forma:*



Onde (E) é a placa emissora de elétrons, (C) é a placa coletora, (A) um amperímetro, (V) um voltímetro, ligados em uma bateria em paralelo.

O processo de emissão de um elétron se dá quando uma certa radiação eletromagnética é incidida na placa emissora (E) e esse elétron absorverá uma certa quantidade de energia discreta, ou seja, um valor inteiro de energia e será ejetado para a placa coletora (C) [...].

Neste caso vemos, implícito na explicação do experimento, a ideia do que seria o efeito fotoelétrico. Por outro lado, há também evidência de aprendizagem inadequada do conceito de quantização, discutido na análise da questão anterior, apresentada na explicação de energia discreta como necessariamente um valor inteiro. Verificando sua resposta à primeira questão da avaliação, o aluno corretamente relaciona variação discreta à descontinuidade, sem fazer alusão a valores inteiros, mas ao utilizar o mesmo conceito em diferente situação, demonstrou que este aspecto do conceito ainda não estava consolidado. Este aspecto nos leva a inferir que esse aluno, apesar de — pela questão anterior — indicar ter adquirido parte do critério para o conceito de quantização, ainda não apresenta um desenvolvimento conceitual suficiente nesta etapa do processo de aprendizagem, de modo a conseguir adequadamente articular os conceitos de modo a resolver a questão.

Tomando como exemplo essas duas respostas citadas, alunos 04 e 09, observamos que uma quantidade significativa de estudantes, cerca de 40%, entendeu que a explicação do processo do efeito fotoelétrico, solicitada na questão, necessariamente envolveria descrever/desenhar o experimento do circuito proposto em um dos textos de estudo da disciplina para observação deste fenômeno (B1). Consideramos que o uso deste esquema

experimental como descrição do processo pode indicar tanto um entendimento limitado sobre a ocorrência do fenômeno do efeito fotoelétrico, que ocorre não somente nessas condições, quanto uma dificuldade na compreensão dos itens necessários à resolução da questão, com base no que se pede no enunciado.

Uma possibilidade é que a presença da palavra *processo* no enunciado tenha induzido esta parcela dos estudantes a entender que se referia diretamente ao experimento. O início da resposta do aluno 04, parece-nos ratificar esta ideia:

Aluno 04 — Para explicar como decorre o processo do efeito fotoelétrico é necessário montar um circuito que represente este fenômeno.

Talvez a substituição da palavra *processo* por *fenômeno* no enunciado fosse mais eficiente para o que se esperava como resolução da questão, no entanto não temos como ser categóricos neste sentido.

No entanto, percebemos que este aspecto não impossibilitou a resolução adequada para a questão quando analisamos respostas como a do aluno 13, apresenta a organização necessária para explicação do fenômeno da emissão de elétrons:

Aluno 13 — No efeito fotoelétrico, uma fonte de luz ilumina um metal e percebe-se, indiretamente, que elétrons escapam do metal. No metal, cada elétron encontra-se ligado ao núcleo e é preciso que energia seja fornecida ao elétron para que essa atração seja vencida e o elétron escape. Segundo Einstein, esta energia é fornecida a cada elétron por meio de um evento envolvendo um elétron e uma partícula de luz (posteriormente denominada fóton). Neste evento, um fóton transfere integralmente sua energia a um elétron, que usa parte dessa energia para vencer a atração elétron-núcleo (essa energia é denominada função trabalho do metal, Φ) e o restante é convertido em energia cinética E_c .

Observamos nesta resposta que o aluno conseguiu agregar os requisitos mínimos que consideramos suficientes para descrição do processo de emissão e, mais ainda, ao incluir outras informações, não fugiu do objetivo da questão. Sobre seu desenvolvimento conceitual, podemos inferir que — comparando o emprego dos conceitos nas questões 01 e 02 — o aluno apresenta uma organização que se aproxima do que consideramos adequado, necessitando apenas superar o equívoco apresentado na primeira questão em relação à variação discreta atrelada a números inteiros.

Prosseguindo na análise da organização conceitual necessária à resolução da questão, definimos que uma resposta apropriada deveria conter os significados de $h\nu$ e Φ como sendo a

energia do fóton e a energia de atração do metal pelo elétron, respectivamente. No quadro 04, este item foi separado em dois, devido ao fato de que alguns alunos apresentaram o significado de um, mas não do outro.

O principal problema relacionado à compreensão do significado do termo $h\nu$ vem da utilização deste como sendo a energia do feixe de luz como um todo e não como a energia de cada fóton (B2), o que aparece em 15% das respostas, como na resposta do aluno 12:

Aluno 12 — [...]A energia cinética de um elétron emitido pode ser representada por $E = h\nu - \Phi$, onde $h\nu$ corresponde a energia da radiação incidente e Φ a função trabalho do metal. Para que o elétron seja emitido é necessário que a radiação incidente seja maior que a função trabalho do metal [...].

Também se observa este tipo de confusão na resposta do aluno 02, que em seu texto inicialmente atribui este termo à energia da luz incidente, mas ao concluir a argumentação o relaciona à energia do fóton:

Aluno 02 — O processo de emissão de um fotoelétron ocorre quando o metal é irradiado por luz de energia adequada ($E = h\nu$); essa energia é absorvida integralmente pelo elétron de forma que há a superação da energia de atração elétron-metal (função trabalho Φ). [...]dessa forma, a energia cinética do fotoelétron pode ser expressa pela equação $E_c = h\nu - \Phi$, que é a diferença de energia entre o fóton absorvido e a função trabalho.

Em contrapartida a esses casos, respostas como a do aluno 08 deixam bem claro a distinção entre a energia do feixe de luz e a do fóton, indicando-nos que este aspecto foi ressaltado em sala de aula e que estes alunos apreenderam bem este aspecto do conceito de efeito fotoelétrico:

Aluno 08 — Com base no modelo quântico da luz, a luz é formada por fótons, isto é, quantidades de energia de valor discreto, descontínuo. Para que ocorra a emissão de um elétron por efeito fotoelétrico, o metal deve ser iluminado com uma luz apropriada (luz com energia suficiente para superar forças atrativas que prendem o elétron ao metal). O elétron absorve integralmente a energia do fóton e ocorre sua emissão. Observação: a energia absorvida não é a do feixe de luz (vários fótons) é a de um único fóton, este deve ter energia suficiente para superar as forças atrativas que prendem o elétron ao metal [...].

Nas demais respostas consideradas incompletas neste aspecto, o que mais ocorreu foi a separação dos significados de h e ν , ou a ausência de qualquer citação à energia do fóton.

Quanto ao significado da função trabalho (Φ), foi verificada uma boa porcentagem de respostas que atendem à organização prevista (70%), sendo que fora desse quantitativo, os erros

se devem muito à inadequação identificada pela confusão entre força e energia na conceituação deste termo (B3) — presente em 18% das respostas — como na resposta do aluno 23:

Aluno 23 — [...] para que um elétron seja emitido, é preciso que o fóton possua energia suficiente para superar a força de atração entre o elétron e o metal, força esta chamada de função trabalho (Φ).

Neste grupo, temos também a resposta do aluno 06, que aplica o conceito físico de trabalho ao definir a função trabalho da seguinte forma:

Aluno 06 — A energia com que os elétrons são ejetados (E_c) depende de quanta energia o elétron recebeu do fóton [...] e do trabalho realizado pelo elétron para chegar à superfície do metal, relacionados da seguinte forma: $E_c = h\nu - \Phi$.

A mesma ideia aparece no texto do aluno 21:

Aluno 21 — [...] Se esta quantidade de energia é igual ou maior ao trabalho necessário para a emissão do elétron a partir da placa, trabalho este representado por Φ , este elétron será emitido com energia cinética igual à diferença entre a energia do fóton e o trabalho realizado para ejetar o elétron [...].

Assim, dentro dos 30% que não indicaram adequadamente o significado do Φ , temos tanto estes que atribuíram outro significado ao termo, quanto os que apenas citaram o termo função trabalho e o caso do aluno 04 - citado anteriormente – que não faz qualquer alusão aos significados de $h\nu$ e Φ .

Por fim, analisamos a presença da ideia de conservação da energia, que justifica a organização da equação de energia cinética do elétron emitido por efeito fotoelétrico, e concluímos que a maioria das respostas (63%) atende a este quesito, como a do aluno 16:

Aluno 16 — [...] O elétron absorve toda a energia do fóton, que é dada por $h\nu$ [...]. Ao absorver essa energia mínima de ligação, Φ , função trabalho, deve superar essa energia para poder escapar da superfície do metal e chegar à placa coletora, C [...]. Ao superar a função trabalho, a energia que resta no elétron é convertida em energia cinética, a qual é a diferença entre a energia absorvida do fóton e a energia para superar a função trabalho, portanto, $E_c = h\nu - \Phi$.

Dentre as respostas com indícios de aprendizagem equivocada deste aspecto do conceito, temos por exemplo o aluno 20, que apesar de apresentar uma argumentação coerente com o esperado, ao concluir sobre a equação citada no enunciado, descreve sua formulação final como um artifício matemático, não empregando neste ponto o princípio da conservação da energia.

Finalizando essa parte da análise, percebemos que através organização conceitual empregada nas respostas às questões 01 e 02, podemos fazer inferências sobre a aquisição e

desenvolvimento conceituais, uma vez que, este desenvolvimento é demonstrado pela explicitação, na resolução escrita da questão, das diversas relações existentes entre os conceitos adquiridos. Neste sentido, observamos que, separadamente, nas duas questões temos porcentagens semelhantes de estudantes que alcançaram a aquisição conceitual adequada — 31% e 30%, respectivamente. Porém, quando fazemos a interseção entre as duas questões, apenas 15% dos estudantes — quatro alunos¹⁵ dentre os vinte e sete participantes — integram o conjunto de respostas que demonstram aquisição que consideramos adequada. Entendemos que este é um dado relevante, uma vez que a interseção entre estas questões indica a percepção dos estudantes sobre a aplicação de um mesmo conceito em diferentes contextos.

A partir da análise da segunda questão e desse comparativo entre as duas questões, podemos extrair mais algumas implicações para o ensino desses conceitos:

- VII. Na descrição do processo do efeito fotoelétrico, pode ser um fator de diminuição de equívocos de aprendizagem ressaltar, no momento de ensino, que a ocorrência deste fenômeno num determinado experimento é apenas uma ilustração e não uma imposição à sua ocorrência.
- VIII. Verificar se, ao nos referirmos ao efeito fotoelétrico, o uso do termo *fenômeno* ao invés de *processo* transmite maior clareza nos enunciados.
- IX. O entendimento sobre os termos da equação para a velocidade de emissão do elétron pelo efeito fotoelétrico gerou dificuldade em mais da metade dos participantes, indicando que há necessidade de esclarecimentos sobre o significado do termo $h\nu$, indicando que este termo se refere à energia de um fóton e não do feixe de luz como um todo.
- X. Sobre o significado da função trabalho, ressaltar a distinção entre os conceitos físicos de força, energia e trabalho, indicando qual destes está de fato relacionado a este termo.
- XI. Esclarecer a aplicação do princípio da conservação da energia na formulação da equação para a energia cinética do elétron emitido por efeito fotoelétrico.
- XII. Elaborar e resolver questões que envolvam a aplicação dos conceitos em contextos distintos, de modo a corrigir e fortalecer a organização conceitual desenvolvida pelo estudante, mediante seu uso na explicação de diferentes fenômenos.

¹⁵ Alunos 1, 15, 22 e 26

3.2.3 Questão 03

A terceira questão desta avaliação pode ser considerada uma continuação das anteriores e nesse ponto salientamos que a organização da avaliação foi feita de tal forma que o estudante aplique os conceitos requeridos nas questões anteriores a fim de explicar diferentes aspectos de um mesmo fenômeno, neste caso, o efeito fotoelétrico.

Seu enunciado é o seguinte: *De acordo com a teoria eletromagnética da luz (ondulatória), na experiência do efeito fotoelétrico, elétrons deveriam ser emitidos quando a luz apresentasse intensidade apropriada, independentemente do valor da sua frequência. Contudo, os resultados experimentais mostram que a emissão de elétrons depende da frequência da luz e independe da sua intensidade. Explique porque a emissão dos elétrons depende da frequência da luz e independe da sua intensidade.*

Antes de prosseguirmos na análise das respostas a esta questão, cabe alguns esclarecimentos sobre o enunciado. Do nosso referencial teórico sobre o efeito fotoelétrico, retiramos a seguinte informação, segundo Einstein: **Se cada quantum de energia da luz incidente transmite sua energia a um elétron, independentemente de todos os outros, então, a distribuição de velocidade dos elétrons, será independente da intensidade da luz incidente.** Desta afirmação, entendemos que a propriedade do elétron emitido que de fato é independente da intensidade da luz incidente é a sua **velocidade**, uma vez que, esta depende exclusivamente da energia do fóton específico com o qual irá interagir e, por sua vez, esta energia depende apenas da frequência da luz e independe da sua intensidade. Por outro lado, também fica claro pelo nosso referencial que **o número de elétrons que deixa o corpo será proporcional à intensidade da luz incidente.** Logo, não podemos afirmar que a emissão de elétrons independe da sua intensidade, pois a intensidade da luz reflete na quantidade de elétrons emitidos, indicando que há uma relação entre a emissão e a intensidade.

Portanto, percebemos que o enunciado estaria melhor escrito caso apresentasse algumas modificações, como, por exemplo: *De acordo com a teoria eletromagnética da luz (ondulatória), na experiência do efeito fotoelétrico, elétrons deveriam ser emitidos quando a luz apresentasse intensidade apropriada, independentemente do valor da sua frequência. Contudo, os resultados experimentais mostram que a energia cinética dos elétrons emitidos depende da frequência da luz e independe da sua intensidade. Explique porque a energia cinética de emissão dos elétrons depende da frequência da luz e independe da sua intensidade.* Neste caso, a substituição do termo *velocidade* por *energia cinética* visa induzir o estudante a relacionar esta questão à anterior, de modo que possa construir uma resolução coerente com

suas respostas anteriores, indicando seu nível de clareza e aquisição da organização conceitual empregada.

Apesar desta falta de clareza do enunciado, acreditamos que o estudante, cuja aquisição conceitual estivesse bem desenvolvida, deveria ser capaz de apresentar na resolução seu entendimento sobre estes aspectos, de certa forma, ampliando ou corrigindo a afirmação da questão.

De modo geral, a resolução da questão envolve uma organização conceitual tal que os seguintes elementos estejam relacionados: breve descrição do processo de emissão pelo efeito fotoelétrico, incluindo o fato desta depender diretamente da quantidade de energia que o elétron recebe do fóton; explicar que a energia do fóton está relacionada à frequência da luz pela equação de Einstein; e indicar que a intensidade da luz está relacionada exclusivamente à quantidade de fótons emitidos e não ao conteúdo energético de cada fóton. Entendemos que o estudante indica sua aquisição conceitual se ele souber relacionar estes três aspectos para chegar à conclusão adequada. Por outro lado, as principais aprendizagens equivocadas estão relacionadas a: ideia de que a intensidade da luz não influencia na energia de emissão de elétrons porque não aparece como um termo na equação que descreve o processo (C1); confusão conceitual entre energia e frequência (C2); e não concluir a argumentação (C3). Esses elementos estão organizados no quadro 05, a seguir.

Primeiramente, verificamos que 44% dos estudantes entendeu corretamente que explicar o porquê de a emissão de elétrons depender da frequência da luz, mas não da sua intensidade, requer descrever o processo de emissão do elétron, 67% relacionou corretamente energia do fóton à frequência da luz e 48% apresentou a ideia de que a intensidade da luz está relacionada à quantidade de fóton emitidos. No entanto, apenas 18% destes estudantes apresentou esses três elementos básicos em sua resolução, aos quais atribuímos o status de ter alcançado uma boa aquisição conceitual. Temos como exemplo a resolução do aluno 06:

Aluno 06 — A emissão de elétron pelo efeito fotoelétrico se dá quando a transferência da quantidade de energia do fóton para o elétron é suficiente para a ejeção do mesmo.

De acordo com Einstein, essa energia é dada por $E = hv$, donde se lê que a energia de um fóton tem relação direta com a frequência da luz [...].

Pelo modelo corpuscular, a intensidade da luz está relacionada com os quanta de energia, isto é, com a quantidade total de fótons que constituem o feixe de luz. A emissão de elétrons, contudo, é um fenômeno microscópico que se dá entre um fóton e um elétron, portanto, não depende da quantidade total de fótons (intensidade). De fato, luz de baixa intensidade também pode produzir emissão de elétrons. Experimentos mostram.

Quadro 05 — Análise das resoluções à Questão 3

QUESTÃO 3 – Efeito Fotoelétrico							
Estudantes	Critério	Organização		Elementos que fogem à organização			Aquisição
	Descrição da emissão	Relação entre E e v	Relação entre intensidade e quantidade de fótons	C1	C2	C3	
01	X	X		X			
02				X	X	X	
03	X		X		X		
04			X				
05		X			X		
06	X	X	X				X
07				X	X	X	
08		X		X			
09				X	X	X	
10	X	X	X				X
11		X			X		
12		X		X	X		
13	X	X					
14		X		X		X	
15	X	X		X		X	
16	X	X	X		X	X	X
17		X	X		X	X	
18	X	X	X			X	X
19		X	X		X	X	
20						X	
21	X	X	X				X
22	X		X	X		X	
23	X	X			X	X	
24			X		X	X	
25		X	X				
26	X	X				X	
27			X	X		X	
%	44	67	48	37	44	55	18

Fonte: Própria autora (2017)

Observamos que nesta resposta o aluno apresenta resumidamente o efeito fotoelétrico como a transferência de energia do fóton para o elétron, provavelmente considerando que na questão anterior ele já havia explanado sobre o assunto, porém apresenta os três elementos necessários e uma conclusão para sua argumentação. De fato, em sua resposta à questão anterior, o aluno descreve adequadamente o efeito fotoelétrico:

Aluno 06 (trecho da resposta à questão 02) — De acordo com o modelo quântico da luz, esta é formada por feixes de partículas [...] que se distribuem no espaço de forma descontínua, os quanta.

Ao incidir sobre determinadas superfícies metálicas, cada quantum ou fóton transfere integralmente energia para um elétron, a qual deve ser suficiente para que este vença as forças atrativas existentes ali e sejam ejetados do material com energia cinética (E_c).

Dentre os equívocos que indicam o fato de que alguns estudantes ainda não haviam adquirido os conceitos e/ou alcançado um desenvolvimento conceitual adequado, temos a ideia de que a independência da intensidade da luz na energia de emissão dos elétrons é devida à ausência desta variável na equação da energia do elétron emitido (C1). Isto é, como na equação da energia cinética do elétron emitido ($E_c = hv - \phi$) não há uma variável para a intensidade da luz, isto é o que justifica esta independência. Observamos que esta é uma ideia presente em 37% das respostas.

De fato, esta é uma informação que inclusive consta em uma das literaturas indicadas para estudo do tema (SERWAY; JEWETT JR, 1992), no entanto, lá esta ideia não é apresentada como a explicação para o fato, mas apenas como uma constatação. Assim como na resolução proposta pelo professor, a explicação para este dado experimental vem do entendimento de que a intensidade da luz está diretamente relacionada à quantidade de fótons emitidos e não à energia individual de cada um destes.

Em seguida, temos a confusão entre os conceitos de energia e frequência (C2), ideia esta que aparece direta ou indiretamente em 44% das respostas. Temos, por exemplo a resposta do aluno 03:

Aluno 03 — A luz é composta por fótons. Um fóton interage com um único elétron transmitindo sua energia para o mesmo e ao adquirir energia suficiente, o elétron será emitido do metal.

Não é qualquer energia que faz com que o elétron seja emitido, essa energia precisa ser maior que a função trabalho, energia atrativa que prende o elétron ao metal. Como quanto maior a frequência, maior a energia do fóton, não é qualquer frequência que possibilita a emissão dos elétrons [...].

Nesta resposta observamos que a ausência da expressão para a energia do fóton, em que aparece o termo relacionado à frequência da luz, dificulta a construção do argumento em que são necessários os conceitos de energia e frequência. Analisando-se as resoluções deste aluno às questões anteriores, observamos que, de modo geral, os conceitos básicos necessários até este ponto não parecem ter sido desenvolvidos adequadamente. Na primeira questão, ele não

apresentou nenhum dos elementos básicos necessários para sua resolução, indicando que não houve compreensão do conceito básico de sistema quântico. Por sua vez, na descrição do efeito fotoelétrico – segunda questão – de certa forma apresenta os elementos básicos, exceto a ideia de conservação de energia. Mas, de modo geral, a falta de clareza na definição dos conceitos e descrição dos processos levou a resoluções na forma de textos com fraca argumentação, no sentido em que não há relações claras entre os conceitos e conclusão das ideias apresentadas.

Temos ainda o problema mais recorrente, a falta de conclusão dos argumentos (C3, presente em 55%). Esclarecemos que este equívoco não diz respeito diretamente à aquisição, uma vez que não é um problema conceitual, mas que faz parte da demonstração de uma organização conceitual bem estabelecida. Exemplificando este caso em que a falta de conclusão indica baixo desenvolvimento conceitual, temos a resposta do aluno 19:

Aluno 19 — A luz, quando tratada pela mecânica quântica, é um feixe de fótons e de energia descontínua, ou seja a luz é constituída por corpúsculos de energia e não por ondas eletromagnéticas, e a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico ocorre com a absorção de um fóton de energia igual a $h\nu$, onde h = constante de Planck e ν = frequência da luz.

Assim, a emissão do elétron depende da frequência da luz por que esta deverá ser maior que a frequência limiar que prende o elétron no átomo em decorrência da atração núcleo-elétron e uma intensidade maior representa um número maior de fótons atingindo a superfície do metal que emitirá maior número de elétrons, porém com a mesma energia cinética.

Toda a construção desse texto carece de organização e de coerência. No primeiro parágrafo percebe-se sua falta de clareza no conceito de quantização da energia da luz e na descrição do efeito fotoelétrico. Na continuação, aparece a confusão entre os conceitos de energia e de frequência e, sem qualquer relação dentro do texto, apresenta a ideia que relaciona intensidade com o número de fótons, mas não há conexão entre as frases escritas. O texto finaliza sem conclusão das ideias apresentadas e, portanto, sem responder ao problema da questão.

Em várias outras respostas, esse tipo de construção frasal se repete, o que dificulta a identificação dos indícios de aprendizagem desses alunos, pois muitos – para além das dificuldades com os conceitos e enunciados - não souberam se expressar por meio dos textos escritos.

Nesse sentido, vamos ter algumas respostas, alunos (02, 07, 09 e 20) que não apresentaram qualquer dos elementos mínimos que consideramos suficientes para resolução da questão. No caso mais extremo, temos o aluno 20, cuja resposta apresenta apenas repetições de

informações fornecidas pelo enunciado, de modo que nem mesmo os equívocos conceituais presentes na maioria das resoluções aparece aqui. Temos:

Aluno 20 — Na experiência do efeito fotoelétrico, os resultados experimentais mostram que ao aumentar a intensidade da luz, uma maior quantidade de elétrons era emitida em um determinado tempo e em menor intensidade, a quantidade de elétrons emitidos era reduzida. Caso a emissão de elétrons dependesse da intensidade da luz, ao aumentar a intensidade, isso afetaria a energia do elétron e sua velocidade de emissão seria maior quando comparada a antes, quando a intensidade era menor, o que não acontece. Logo, a emissão dos elétrons depende da frequência da luz e não da sua intensidade, como sugeriu a teoria eletromagnética da luz, admitindo somente o comportamento ondulatório da luz.

Já na resposta do aluno 09, observamos que em sua tentativa de utilizar os conceitos e organizá-los numa resolução escrita, demonstrou novamente sua imaturidade conceitual, ratificando que não havia alcançado o desenvolvimento dos conceitos, conforme indicamos na análise das suas respostas às questões 01 e 02. Sua resolução foi a seguinte:

Aluno 09 — Na experiência do efeito fotoelétrico a emissão dos elétrons se deve ao fato do elétron absorver uma certa quantidade de energia de frequência adequada para que ocorra a sua ejeção e parte dessa energia seja convertida em energia cinética se a energia for maior ou igual à função trabalho do material.

Segundo a equação da energia cinética: $E_c = h\nu - \phi$, a emissão do elétron independe da intensidade da luz, esta depende da frequência associada ao feixe luminoso e da função trabalho.

Com base nesta resposta, observamos novamente que o estudante não tem fundamentação suficiente para explicar efeito fotoelétrico, isto fica claro pela indefinição da origem da “quantidade de energia de frequência adequada”, bem como pela falta de detalhamento na descrição do processo. Além disso, o estudante também não apresenta os outros elementos básicos à resolução, caindo no caso de justificar a independência da intensidade da luz na energia de emissão do elétron pela prerrogativa de que o que não está numa equação sobre o processo não influencia o processo.

Dada a análise para esta questão, podemos destacar implicações para o ensino:

- XIII. Sobre a relação entre a frequência da luz incidente, a energia do fóton e a velocidade de emissão do elétron, a principal confusão conceitual dos estudantes diz respeito à confusão conceitual entre energia e frequência, aspecto este que pode ser elucidado pelo entendimento dos termos da equação para energia cinética do elétron emitido, conforme salientado no item imediatamente anterior a este.

- XIV. No desenvolvimento da compreensão sobre a relação entre intensidade e quantidade de fótons e da independência entre a intensidade da luz incidente e a velocidade de emissão do elétron, cabe destacar a definição de intensidade da luz segundo o modelo corpuscular, como forma de superação da ideia apresentada por muitos de que a intensidade da luz não influencia na velocidade dos elétrons porque não aparece dos termos da equação.
- XV. Na resolução de questões salientar que a organização textual (aspecto externo) reflete a organização conceitual (aspecto interno) do estudante.

3.2.4 Questão 04

A quarta questão desta avaliação envolve estabelecer relações matemáticas entre as equações de De Broglie e a da energia cinética do elétron e realizar os cálculos, atentando para todas as unidades envolvidas nestas relações. Seu enunciado é o seguinte: *Em um microscópio eletrônico os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial para atingir a energia cinética necessária à medição pretendida. Calcule a diferença de potencial necessária para elétrons apresentarem comprimento de onda de $4,0 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$. Obs.: Um elétron-volt é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo. A energia cinética de um elétron em unidade elétron-volt é calculada multiplicando sua carga pela diferença de potencial aplicada.*

Conforme nosso referencial teórico ressalta, entendemos o conceito de dualidade onda-partícula como propriedade de sistemas quânticos, como os átomos, elétrons e a luz, que apresentam, em algumas situações, comportamento de partícula e, em outras, comportamento ondulatório. Essa ideia pode ser representada fisicamente pela equação de De Broglie para as partículas ($\lambda = \frac{h}{p}$, em que p corresponde ao momento, o qual é dado pelo produto entre massa e velocidade da partícula). Esta equação implica que uma partícula de massa m se comporta como onda, uma vez que, há um comprimento de onda λ diretamente relacionado a esta.

Partindo desse princípio, entendemos que na resolução desta questão é fundamental que o estudante primeiramente tenha adquirido o conceito segundo o qual é possível calcular um comprimento de onda para uma partícula como o elétron, ou seja, a dualidade onda-partícula. Além disso, cabe ao estudante, via interpretação de texto, saber relacionar a informação fornecida sobre a relação entre energia cinética e diferença de potencial com o comprimento de

onda que se pede para calcular. Logo, entendemos que a questão não é meramente matemática, existe uma organização conceitual que o estudante deve ter adquirido, a qual constitui a fundamentação básica para sua resposta.

Sendo assim, os elementos necessários à respostas são: utilizar a relação de De Broglie ($p = \frac{h}{\lambda}$) e relacionar esta equação à da energia cinética do elétron escrita em termos do momento linear ($E_C = \frac{p^2}{2m}$); utilizar a relação citada no enunciado entre energia cinética e voltagem ($E_C = e\Delta V$) para chegar numa expressão que, por fim, relaciona os dois aspectos citados na questão, a diferença de potencial e o comprimento de onda do elétron ($\Delta V = \frac{h^2}{2em\lambda^2}$); executar os cálculos, chegando a um dos valores possíveis $\Delta V = 9,400 \times 10^2 \text{ J/C}$ ou $\Delta V = 58,67 \times 10^{20} \text{ V}$. Por outro lado, dentre os principais equívocos na organização conceitual das resoluções detectamos primeiramente a falta de percepção da relação de Broglie, a qual também configura falta de atenção ao enunciado (**D1**) e a relação entre unidades feita pela fórmula da energia cinética (**D2**).

O quadro 06, a seguir, apresenta os resultados da análise das respostas dos alunos quanto a estes aspectos. As porcentagens apresentadas no quadro foram obtidas para o total de alunos **que responderam à questão**, portanto, 19 respostas correspondem ao 100% neste caso.

Quando passamos a analisar as respostas, o primeiro aspecto que nos chamou à atenção foi o elevado número de alunos que não responderam (cerca de 30% do total de alunos). Entendemos que dois fatores são relevantes neste sentido: o fator tempo, uma vez que, por se tratar da última questão, alguns podem não ter reservado tempo suficiente para resolvê-la e optaram por deixar em branco; bem como a falta de compreensão do enunciado aliada à confusão entre as grandezas envolvidas, pois mesmo se tratando de cálculos simples, a falta de resolução de exercícios – que percebemos também pelas respostas às outras questões – pode ter dificultado a percepção das relações matemáticas existentes entre os conceitos necessários e, portanto, a resolução da questão.

Quadro 06 — Análise das resoluções à Questão 4

Estudantes	Organização			Elementos que fogem à organização		Aquisição
	Relação de De Broglie	Relação entre E_C e voltagem	Cálculos	D1	D2	
01		X		X	X	
02		X		X		
03	-	-	-	-	-	-
04				X	X	
05	-	-	-	-	-	-
06	-	-	-	-	-	-
07	-	-	-	-	-	-
08	-	-	-	-	-	-
09				X		
10		X		X		
11				X	X	
12		X		X		
13	X	X				X
14		X		X	X	
15		X		X	X	
16	X	X				X
17				X	X	
18	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-
20				X	X	
21		X		X	X	
22				X	X	
23	-	-	-	-	-	-
24				X		
25		X		X	X	
26				X	X	
27				X	X	
%	10	53	0	89	74	10

Fonte: Própria autora (2017)

Podemos notar nesta resolução que o aluno utiliza duas das equações necessárias para sua resolução: a relação entre energia cinética e diferença de potencial e a relação de De Broglie. Inclusive, o caminho matemático que decidiu utilizar – primeiro determinar a velocidade do elétron pela relação de De Broglie; aplicar este valor à equação da energia cinética e calcular a diferença de potencial requerida na questão - poderia ter levado à resposta correta. Seu principal problema está relacionado à parte matemática, especialmente no que diz respeito às operações com potências. Há também simplificações em excesso, em que não fica claro o domínio do aluno sobre as conversões entre unidades – por exemplo, a utilização do comprimento de onda em nanômetro, ao passo no valor final o número aparece em unidade de metro por segundo - bem como o raciocínio utilizado na organização dos cálculos. Por outro lado, positivamente, a resolução deste aluno relaciona unicamente grandezas diretamente relacionadas ao comportamento do elétron, o que só é possível, neste caso, por meio da equação de De Broglie.

O aluno 13, por sua vez, estabelece praticamente a mesma linha de raciocínio: partindo da equação de De Broglie, usa os dados fornecidos para calcular a velocidade do elétron; aplica este valor à equação clássica da energia cinética e, por meio das relações entre unidades, converte esse valor para elétron-volt; por fim, utiliza a relação entre energia cinética e diferença de potencial para calcular o ΔV em unidade eV/C. Aqui também o mesmo tipo de erro matemático é cometido: a conversão do comprimento de onda do elétron de nanômetro para metro ocorre numa ordem de grandeza errada – em vez de 10^{-11} , utilizou 10^{-10} ; e o fator de 1 para $\frac{1}{2}$ na conversão de J para $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ – quando deveria ser 1 para 1.

Esses equívocos resultaram em valores que não correspondem ao esperado, porém, devido ao fato de a cadeia de raciocínios e a utilização das equações esperadas estarem corretas e que nosso foco de análise é a organização dos conceitos com base nas relações existentes entre esses, consideramos que nestes dois casos (alunos 13 e 16) há indícios de aquisição dos conceitos envolvidos.

No que diz respeito aos demais, uma forma de raciocínio apareceu em comum à maioria (D2, presente em 74%): utilizar a expressão da energia cinética para a o efeito fotoelétrico $E_c = hv$ (uma forma simplificada da expressão $E_c = hv - \Phi$, considerando que o elétron se encontra livre de forças atrativas que impedem seu movimento); substituição da frequência pela expressão do comprimento de onda para a luz ($v = c/\lambda$), chegando à expressão $E_c = hc/\lambda$; calcular o valor da energia cinética a partir dos valores fornecidos em Joules e convertê-la a elétron-volt; por fim – em alguns casos – utilizar a relação entre energia cinética e diferença de potencial para chegar à resposta final.

Pesquisando nos diversos textos indicados aos alunos para estudo do tema, percebemos que este raciocínio, que aparece incompleto nestas respostas, é apresentado como a parte inicial do desenvolvimento da hipótese de De Broglie. No entanto, na continuidade do seu pensamento ele organiza as equações de modo que o termo mc – que só poderia ser aplicado à luz, pois c corresponde à velocidade da luz no vácuo – é substituído por mv – momento linear, em que v é a velocidade de uma partícula, como o elétron. Neste ponto a resolução desses alunos falha por atribuir a velocidade da luz ao elétron, algo fisicamente inviável.

À medida que a análise desta questão aponta para uma baixa aquisição, também revela aspectos sobre o processo de desenvolvimento conceitual para a dualidade onda-partícula. Assim como ressaltamos nas implicações para o ensino resultantes da análise da primeira questão, pelo menos neste estágio inicial de contato com os conceitos abordados, verificamos que este grupo se encontra numa etapa do desenvolvimento em que grande parte dos estudantes apresenta dificuldades na articulação entre o emprego do conceito e sua justificativa. Especificamente no que diz respeito à quarta questão, nenhuma das resoluções explicitou que o emprego da equação de De Broglie só é viável se considerarmos o conceito segundo o qual é possível calcular um comprimento de onda para um elétron, a saber, a dualidade onda-partícula.

Além disso, a contundente falta de percepção da relação existente entre a equação fundamental à resolução da questão (equação de De Broglie) e a expressão proposta no enunciado (entre energia cinética e diferença de potencial) corrobora para nosso entendimento de desenvolvimento abaixo das expectativas. Ratificamos essa afirmativa à medida que nenhum dos estudantes apresentou em sua resolução uma organização conceitual tal que os conceitos e equações fundamentais aparecem relacionados corretamente ao significado das grandezas envolvidas, resultando no cálculo correto da medida requerida.

Da mesma maneira como nas questões anteriores, estas inferências sobre como os estudantes desenvolvem o conceito de dualidade onda-partícula, se refletem em implicações para o ensino:

- XVI. O estudo sobre o desenvolvimento histórico do conceito deve ocorrer no sentido de promover uma maior compreensão sobre o significado físico da sua formulação e das equações envolvidas.
- XVII. A compreensão sobre a cadeia de raciocínios que levam à formulação da equação de De Broglie para as partículas pode ser relevante para que o estudante tenha segurança em utilizá-la na resolução de problemas, especialmente quando se requer aliar propriedades de onda e de partícula a um mesmo sistema.

XVIII. Destacar as grandezas físicas envolvidas e suas unidades de medida, bem como suas relações e conversões matemáticas.

3.3 RESPOSTAS À AVALIAÇÃO EM 2016.1: ALUNOS REPETENTES

Verificamos nas análises das avaliações dos estudantes no período 2015.2 que, até o momento da primeira avaliação, alguns ainda não haviam desenvolvido adequadamente as relações entre os conceitos de quantização e de dualidade onda-partícula. Identificamos que dentre os estudantes desse grupo, quatro pessoas foram reprovadas e voltaram a cursar a disciplina logo no período seguinte, 2016.1. Sendo assim, a análise que se segue diz respeito a como esses alunos repetentes desenvolveram esses mesmos conceitos um semestre após terem cursado a disciplina pela primeira vez.

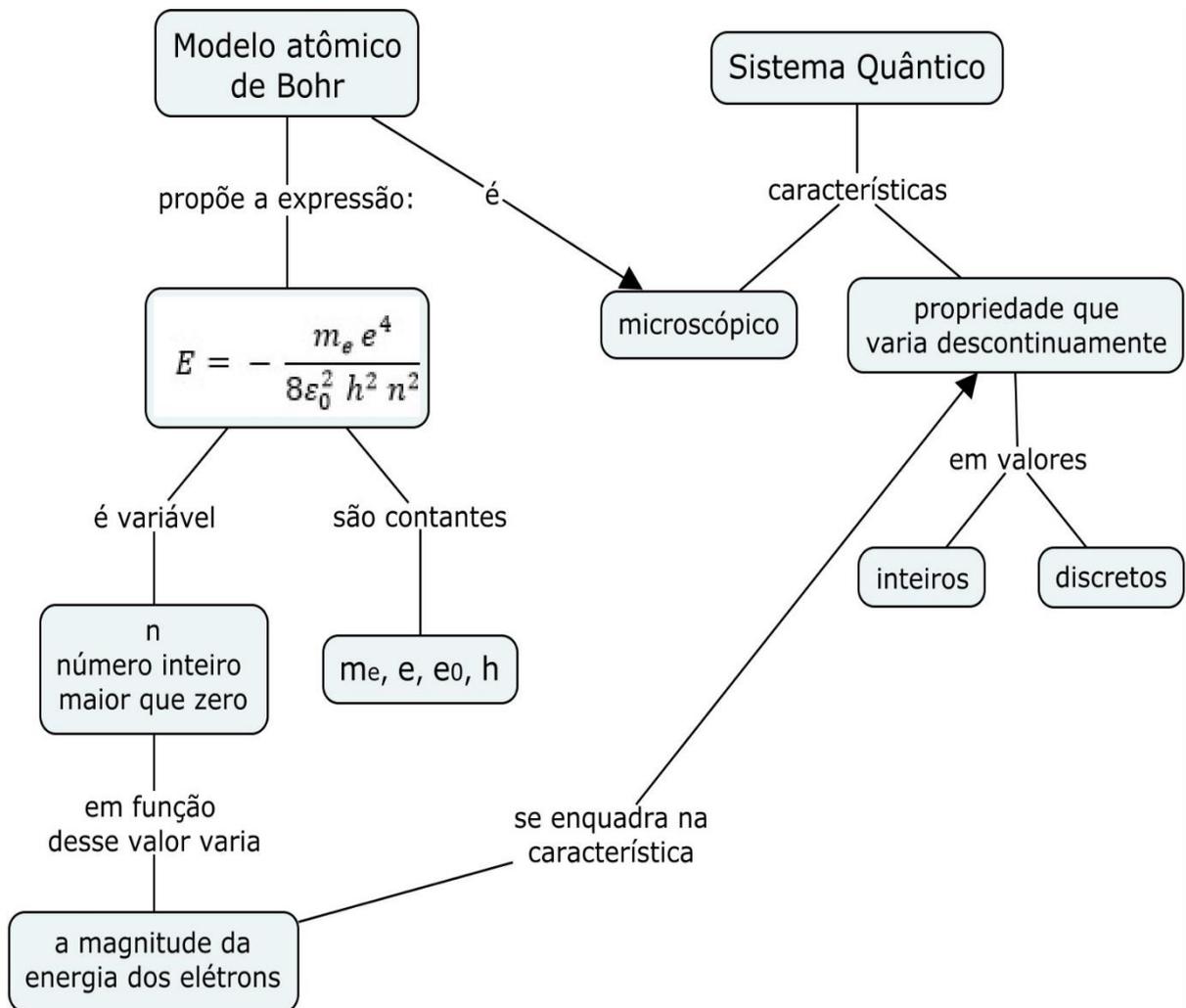
Ao ser questionado em 2015.2 a usar a definição de sistema quântico para determinar se o modelo atômico de Bohr poder ser considerado um sistema quântico ou não, o aluno 02 apresenta a seguinte resposta:

Aluno 02 – Pode-se observar que a expressão para a energia dos elétrons proposta por Bohr é constituída de quatro propriedades cujos valores são constantes (m_e , e , ϵ_0 , h) e um número inteiro maior que zero (n). Assim, seguindo a expressão [...], a magnitude da energia dos elétrons varia em função do valor de n .

Considerando a definição de sistema quântico adotado na disciplina, o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como um sistema quântico porque este é microscópico e apresenta pelo menos uma propriedade (energia) que varia descontinuamente com valores discretos e inteiros.

Transformando-se esta resposta em mapa conceitual, chegamos na configuração representada na figura 04 a seguir, em que priorizamos a ordem da cadeia de raciocínios elaborada pelo estudante e estabelecemos as relações através dos conceitos que ele optou por usar.

Figura 04: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 02 em 2015.2



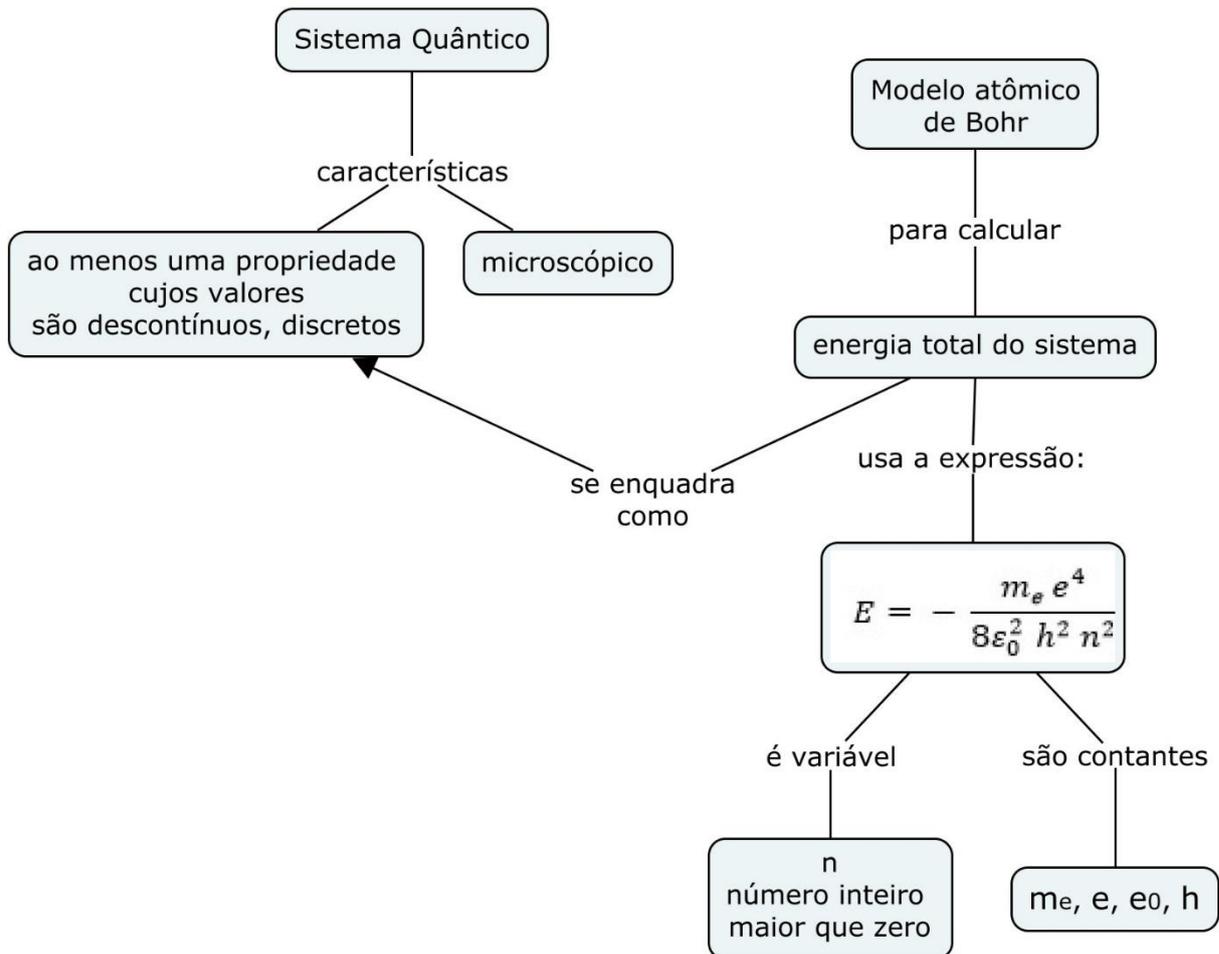
A fim de estabelecermos a comparação, temos agora sua resposta à mesma questão entregue como avaliação parcial no semestre seguinte:

Aluno 02 – Um sistema quântico é um sistema microscópico que possui pelo menos uma propriedade cujos valores são discretos, descontínuos [...]

Conforme a definição de sistema quântico adotado no curso, o modelo atômico de Bohr pode ser considerado um sistema quântico pois a energia do sistema pode ser calculado conforme a expressão: $E_{total} = - \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$, onde todas os valores são constantes, exceto a variável “n” que é um número inteiro maior que zero. Assim, os valores da E_{total} do sistema variam descontinuamente, o que está de acordo com a definição de sistema quântico.

Esta resposta deu origem a um outro mapa conceitual, apresentado como a figura 05, a seguir.

Figura 05: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 02 em 2016.1



Podemos observar entre as duas respostas e seus respectivos mapas conceituais, um refinamento na argumentação e o uso de termos e relações mais adequados.

O principal fator a se notar é que na primeira resposta, o aluno demonstra insuficiência no desenvolvimento da ideia de variação descontínua de uma propriedade, pois não associa o adjetivo ‘discreto’ como um sinônimo de descontínuo – se aproxima mais da ideia de que discreto é um tipo de variação descontínua – e, por outro lado, limita a descontinuidade a valores inteiros. Além disso, de modo geral, a redação da resposta apresenta os conceitos numa ordem que dificulta seu entendimento, com a conceituação de sistema quântico apenas ao final.

Na segunda resposta, notamos uma melhora significativa no texto. O aluno apresenta o conceito básico necessário, para em seguida o relacionar ao dado fornecido no enunciado e chegar à conclusão esperada. A ideia de variação em números inteiros não aparece no texto, ao passo que agora os termos ‘descontínuo’ e ‘discreto’ aparecem dentro da frase construída como sinônimos, o que está correto. Ressaltamos, por outro lado, que a ausência de conexão entre o modelo de Bohr e a característica do sistema quântico ser microscópico, bem como a atribuição

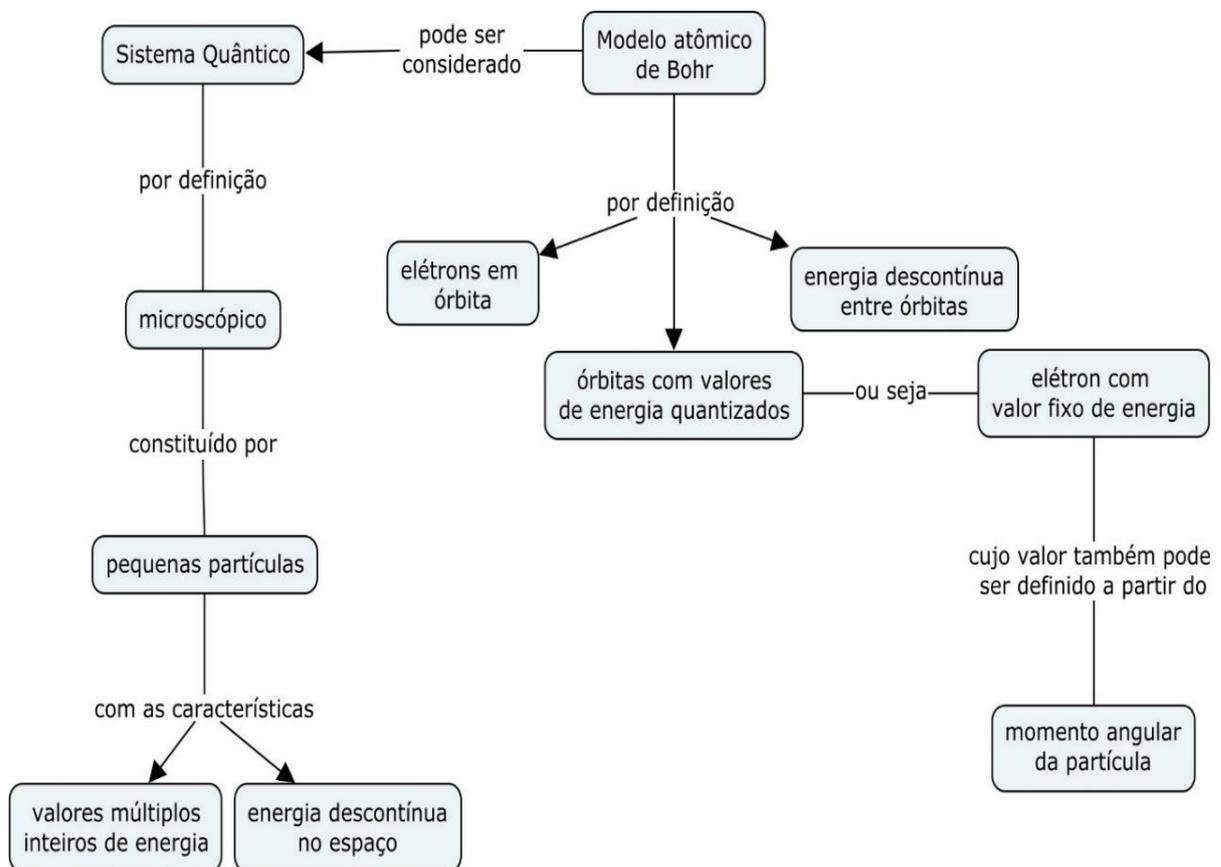
da equação como sendo para o cálculo da energia total do sistema - quando se trata do cálculo da energia do elétron – indicam algumas insuficiências ainda presentes no segundo momento de aprendizagem.

Seguindo a mesma linha de raciocínio, analisamos as respostas do aluno 07. Em 2015.2 ele respondeu a esta questão da seguinte forma:

Aluno 07 – De acordo com as informações fornecidas pelo enunciado e a definição do sistema quântico, como sendo um sistema microscópico constituído por pequenas partículas que assumem valores múltiplos inteiros de energia e apresenta energia descontínua no espaço. Já o modelo atômico de Bohr é definido da seguinte forma: em um átomo os elétrons estão distribuídos em órbitas, em cada órbita os valores de energia são quantizados, ou seja, cada elétron tem um valor fixo de energia e a energia de uma órbita para outra é descontínua. No átomo de Bohr pode-se definir também a energia de cada elétron a partir do momento angular da partícula. Com base nessas informações podemos afirmar que o modelo atômico de Bohr assume características de um sistema quântico.

Dessa respostas derivamos o seguinte mapa conceitual:

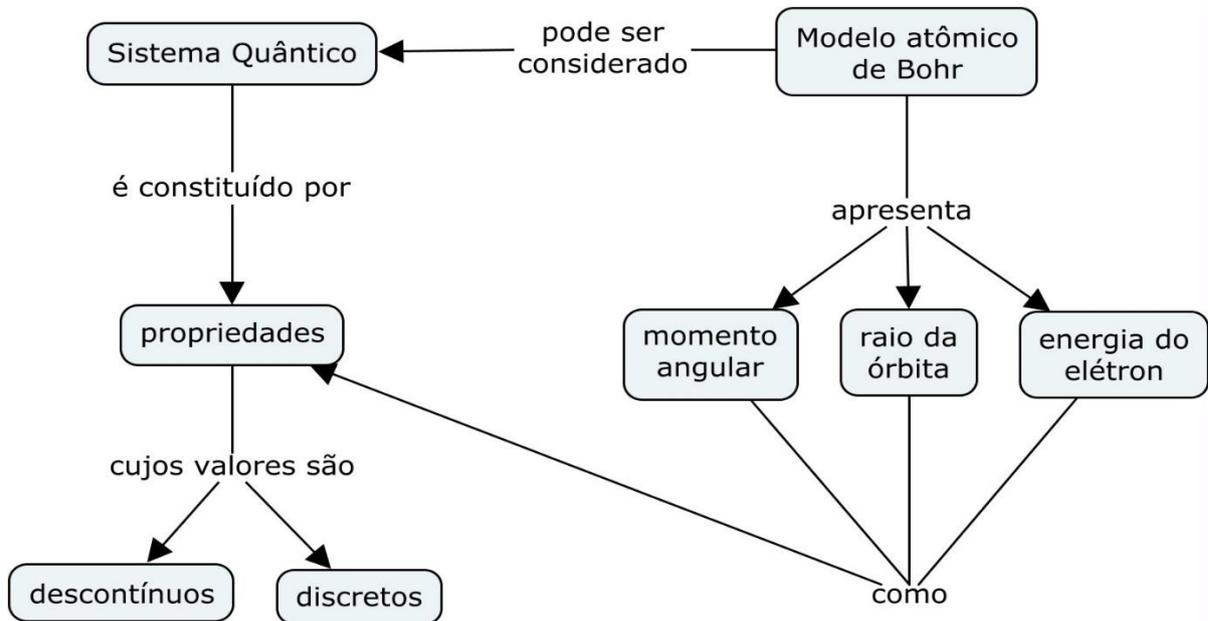
Figura 06: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 07 em 2015.2



No período seguinte, temos a seguinte resposta:

Aluno 07 – Um sistema quântico é constituído por propriedades cujos valores são discretos e descontínuos. Para o átomo segundo o modelo de Bohr, pode ser considerado um sistema quântico porque os valores do momento angular, o raio da órbita eletrônica e a energia eletrônica são grandezas cujas propriedades são discretas e descontínuas em relação aos demais valores.

Figura 07: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 07 em 2016.1



Vemos nesses mapas conceituais que o aluno 07 alcançou no segundo período uma compreensão de sistema quântico que, com base na sua resposta, podemos afirmar que não houve na primeira vez que cursou a disciplina. Percebemos na primeira resposta uma total confusão entre conceitos e relações. De fato, a única descrição adequada à conceituação de sistema quântico é de que deve ser microscópico. A ideia a seguir de sistema constituído por pequenas partículas que apresentam valores múltiplos inteiros de energia e energia descontínua no espaço não está de acordo com a teoria estudada, até mesmo se estivesse se referindo às características da luz como um sistema quântico. A mesma confusão conceitual aparece na caracterização do modelo atômico de Bohr, em que o conceito de órbita aparece desnecessariamente e mal empregado nas suas colocações. Além disso, não se estabelece as relações que unem o modelo atômico de Bohr ao conceito de sistema quântico, como se observa neste mapa.

Desta a organização sistemática, segundo o aluno 07, podemos concluir que, no primeiro momento, a aquisição do conceito de sistema quântico ainda não havia sido desenvolvida a ponto de considerarmos adequada sua aprendizagem. Este fato é facilmente observável pela ausência do invariante do conceito no mapa conceitual que representa seu entendimento do assunto.

Na sua segunda resposta, por outro lado, observamos que a linguagem empregada denota maior compreensão do enunciado e dos elementos básicos necessários à resolução da questão. No entanto, ainda percebemos que, apesar da melhoria na delimitação do texto, alguns conceitos e suas relações ainda não tinham sido completamente desenvolvidos.

Primeiramente, a definição de sistema quântico apresenta um problema semântico em que a palavra ‘constituído’ não é adequada para relacionar os conceitos ‘sistema quântico’ e ‘propriedades’. As propriedades de um sistema são consequências de sua constituição e não sua constituição em si. Notamos que o invariante do conceito ainda não está plenamente estabelecido, pois um dos seus critérios é ser microscópico e este aspecto nem mesmo é citado. No único critério que estabelece para o sistema ser quântico, aparece a ideia de que os termos ‘descontínuas’ e ‘discretas’ se referem a características diferentes, quando na verdade são sinônimos. Por fim, ao incluir o modelo de Bohr no sistema, o faz adequadamente por meio do estabelecimento da relação entre algumas das suas propriedades – momento angular, raio da órbita, energia do elétron – com o critério que cita, a descontinuidade dos seus valores.

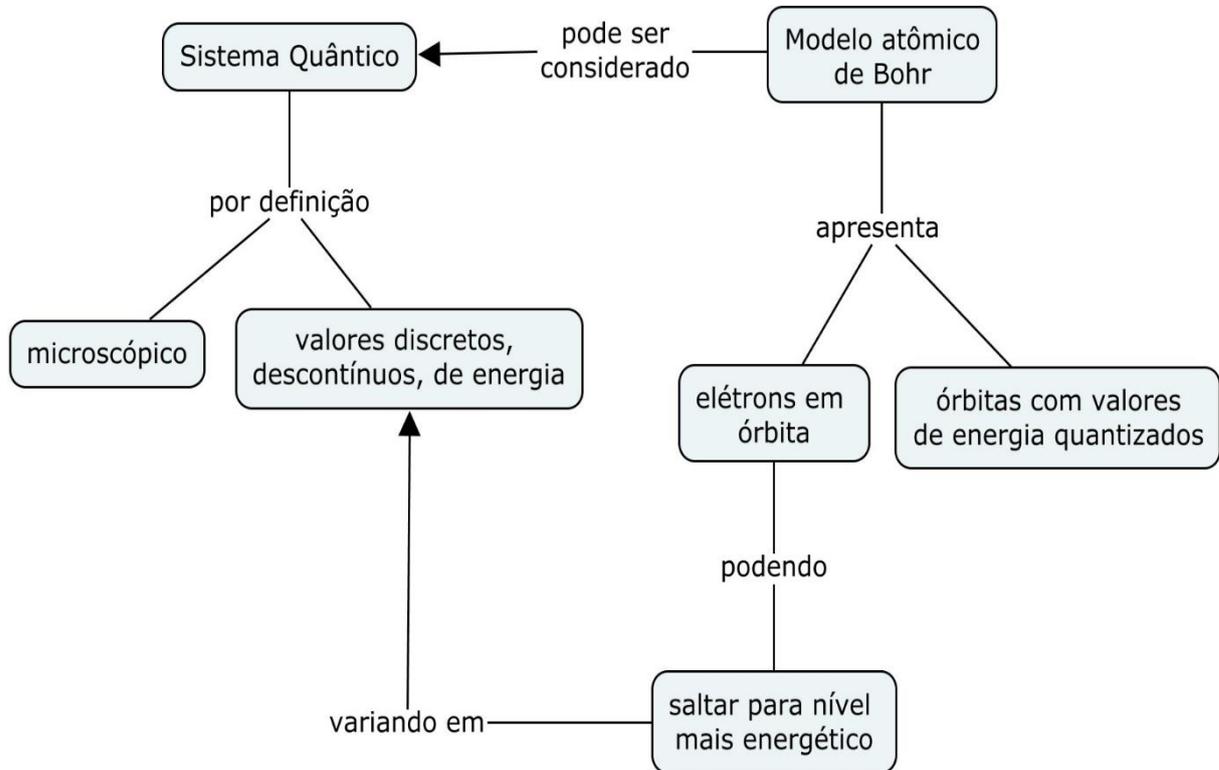
Sendo assim, podemos inferir que, quanto ao conceito de sistema quântico, o aluno 07 parece ter alcançado um grau maior de desenvolvimento na repetição do curso. No entanto, a análise da linguagem empregada e das relações estabelecidas na sua resolução indica que ainda havia aspectos básicos do conceito que não estavam bem estabelecidos, sendo necessário reforçá-los, visto que constituem a fundamentação para a ampliação da rede de conceitos que se segue no decorrer do curso.

Prosseguimos então a análise para o aluno 08, que apresentou a seguinte resposta no período 2015.2:

Aluno 08 – Com base na equação $E = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$ e considerando a definição de sistema quântico que adotamos na disciplina, sistemas microscópicos com valores discretos, descontínuos de energia, o modelo de Bohr pode ser considerado quântico, pois os elétrons estão em órbita em níveis de energia, com energia quantizada, podendo receber energia e saltar para um outro nível mais energético, entretanto não perdendo sua quantidade de energia inicial, variando de forma discreta, descontínua.

Temos então o seguinte mapa conceitual:

Figura 08: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 08 em 2015.2



Neste primeiro mapa conceitual identificamos na definição do conceito de sistema quântico a correta atribuição do critério ser microscópico. Porém, no estabelecimento do segundo critério, erra pela omissão da ideia de propriedade com variação discreta e pela delimitação da descontinuidade à energia. Ao tentar conectar o modelo de Bohr ao conceito de sistema quântico, não usa a equação fornecida como base para desenvolvimento da justificativa, envolvendo desnecessariamente – e conceitualmente errado – os conceitos de órbita e níveis de energia. Portanto, sua organização conceitual indica que, neste primeiro momento, o aluno não havia apreendido os critérios necessários para se enquadrar um dado sistema como quântico. A linguagem empregada do texto escrito corrobora a afirmação de que a aquisição do conceito, nos termos de Hardy-Vallée, também não havia se efetuado.

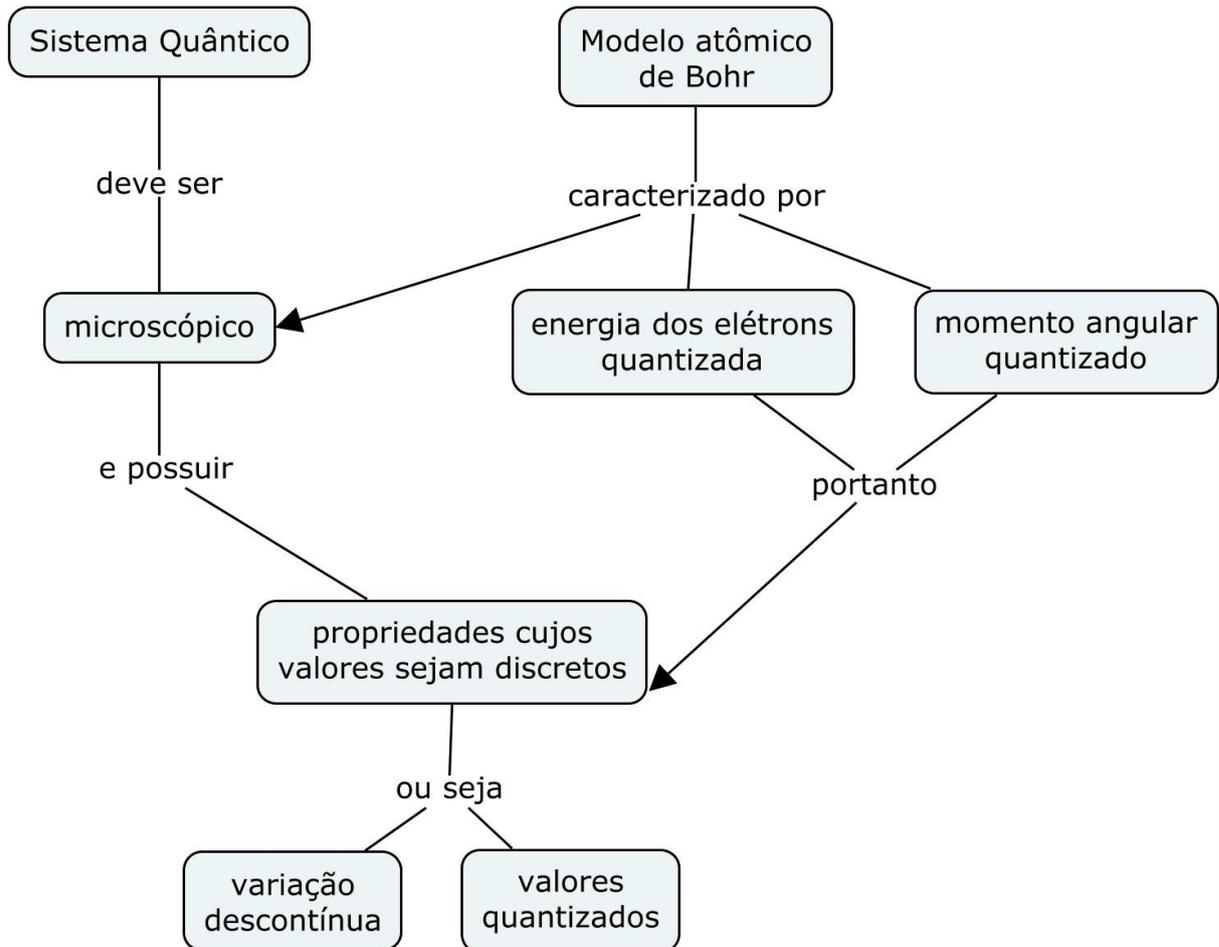
Em 2016.1 sua resposta foi:

Aluno 08 – Para que um sistema possa ser denominado quântico deve ser microscópico e possuir alguma propriedade cujos valores sejam discretos, variem descontinuamente, ou seja, valores quantizados [...].

Com base na definição que caracteriza um sistema quântico, um átomo segundo o modelo atômico de Bohr é um sistema microscópico, a energia dos elétrons é quantizada, assim como seu momento angular, portanto caracterizando um sistema quântico.

Essa resposta deu origem ao seguinte mapa conceitual:

Figura 09: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 08 em 2016.1



Podemos notar agora uma acentuada melhora na argumentação e na sistematização dos conceitos. Primeiramente, a identificação dos critérios para sistema quântico estão corretas: ser microscópico e ter variação descontínua em alguma propriedade. Os termos quântico e discreto aparecem como sinônimos de variação descontínua – apesar de que consideramos que não é necessário apresentar os três termos, como notamos em várias resoluções, inclusive nesta. A inclusão do modelo atômico de Bohr aparece adequadamente pela premissa de ser microscópico, mas também através de algumas de suas propriedades que variam descontinuamente, preenchendo os requisitos para ser sistema quântico. Temos então uma organização conceitual na segunda resolução que apresenta os indícios de aquisição do

conceito, indícios esses representados pela linguagem bem empregada, presença dos critérios elementares e o estabelecimento adequado de relações entre conceitos.

Por fim, temos a resolução do aluno 09:

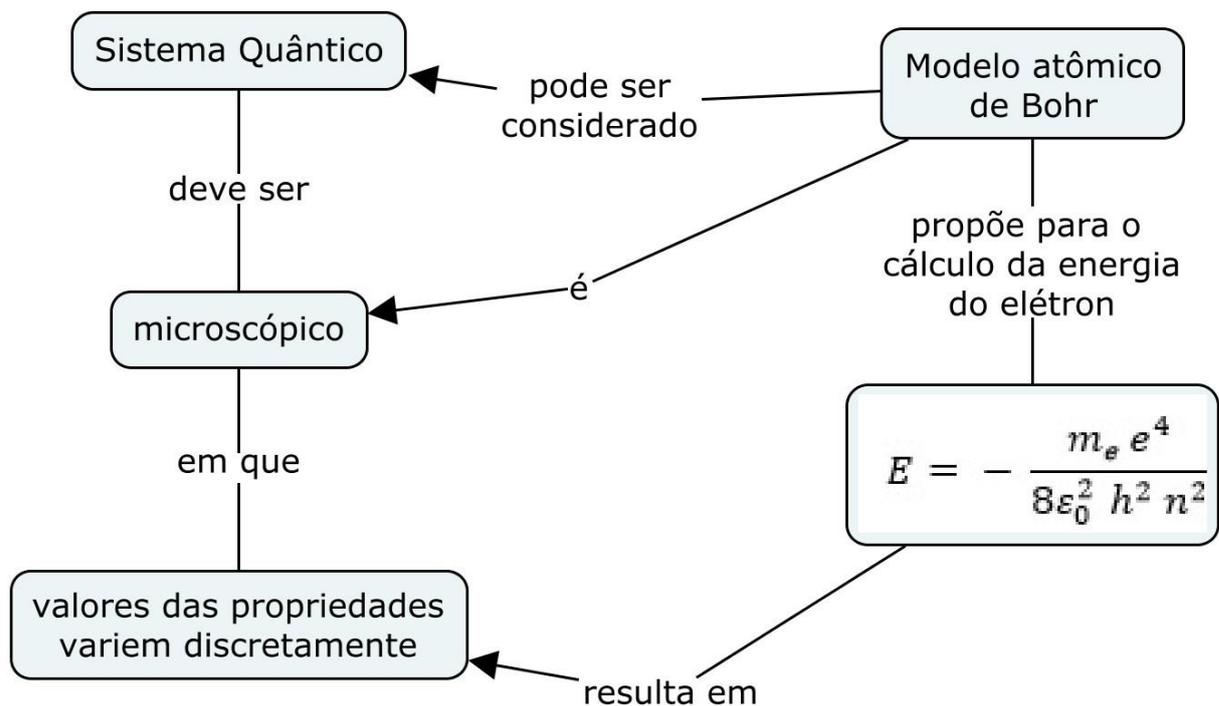
Aluno 09 – Um sistema quântico é um sistema microscópico em que os valores das propriedades variem de forma discreta, daí diz-se que o sistema é quantizado. Por exemplo a energia dos elétrons em um átomo apresenta valores discretos, varia de forma descontínua.

[...]

No entanto Bohr propôs que essa energia era calculada pela seguinte expressão $E = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$, dessa forma pode-se dizer que o modelo atômico de Bohr pode ser considerado como um sistema quântico, pois é um sistema microscópico e apresenta valores de energia discretos dados por esta equação da energia.

O mapa conceitual desenvolvido a partir desta resposta aparece a seguir.

Figura 10: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 09 em 2015.2



Este aluno, em sua primeira resolução, apresenta os dois critérios para que um sistema seja quântico. Porém, ao segundo fazemos a ressalva de o uso do plural em “os valores das propriedades variem de forma discreta” dá a entender que a totalidade das propriedades do

sistema devem variar discretamente, quando basta que uma apresente este comportamento para que o mesmo possa ser enquadrado como quântico.

Vale salientar que a parte excluída da transcrição é um trecho relativamente grande em que o aluno versa sobre aspectos do modelo de Bohr que são irrelevantes para a resolução da questão. É tanto assim que ao concluir o texto, ele resgata a informação que cita inicialmente – sobre a energia dos elétrons – para tentar fazer o que se pede no enunciado, sem utilizar essas informações que acrescenta desnecessariamente.

Observamos neste seu primeiro mapa conceitual que a ligação entre o modelo de Bohr e sistema quântico se dá pelo critério de ser microscópico e pelo fato de ter propriedade com variação discreta – apesar de que aqui ele não usa o termo variação. No entanto, o aluno apresenta neste trecho insuficiência na aquisição destes conceitos por não desenvolver o argumento sobre o porquê de a equação demonstrar que a energia teria variação descontínua. Ele apenas faz esta afirmação e conclui o texto.

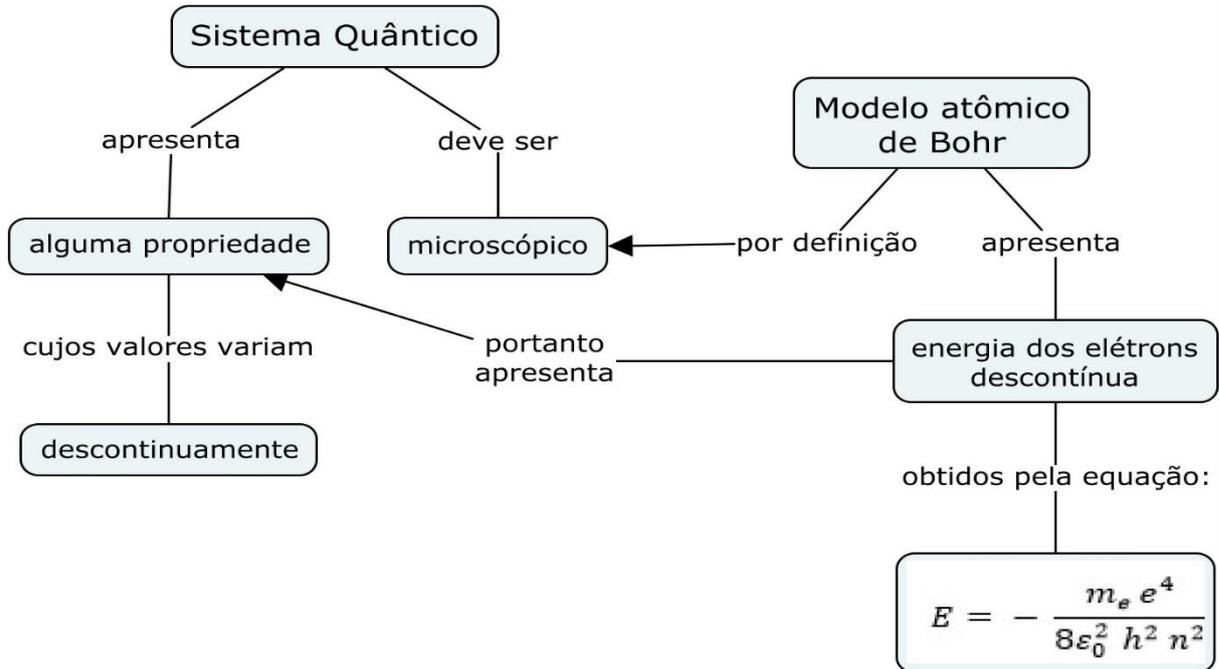
Passando agora para sua resolução ao repetir a disciplina, notamos primeiramente que seu texto é bem mais conciso e as relações estão mais claramente apresentadas:

Aluno 09 – Niels Bohr propôs um modelo atômico no qual a energia era calculada pela seguinte expressão $E = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}$ [...]. Segundo a definição, um sistema é considerado quântico se é microscópico e possui alguma propriedade cujos valores variam descontinuamente. O átomo é um sistema microscópico, por definição. Pela expressão da energia dos elétrons no modelo atômico de Bohr, vemos que seus valores são descontínuos: $K/4, K/9, etc.$, onde $K = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}$. Portanto, o modelo atômico de Bohr pode ser considerado um sistema quântico.

Seu respectivo mapa conceitual é apresentado a seguir como a figura 11.

Observamos nessa resposta uma superação em relação ao que dissemos anteriormente sobre as associações estarem apresentadas mais claramente: agora o critério sobre a descontinuidade dos valores está limitado a alguma propriedade e não à inteireza das propriedades; o modelo é apresentado como microscópico por definição; utiliza a equação para identificar uma propriedade que varia descontinuamente neste modelo.

Figura 11: Mapa conceitual de sistema quântico e modelo de Bohr segundo o aluno 09 em 2016.1



Essa é uma resposta bem elaborada, porém, fazemos aqui uma ressalva para o fato de que parece ser uma cópia da resolução do professor para essa mesma questão no período anterior. De fato, o aluno teve acesso à mesma, pois foi enviada a todos da turma como forma de justificativa da correção e para auxiliar na elaboração das respostas escritas ao longo da disciplina. Sendo assim, não podemos aqui tirar conclusões sobre aprendizagem do aluno sobre esse conceito específico, embora consideremos que mesmo com a aparente cópia, ele pode ter apreendido melhor no segundo momento esses conceitos e suas relações.

Das análises do desenvolvimento destes quatro alunos, concluímos que em todos os casos houve melhoras na abordagem do conceito requerido, indicando que nesse processo ampliou-se o entendimento do invariante, a identificação dos critérios, o estabelecimento das relações numa organização sistemática e, conseqüentemente, sua aquisição. Dentre estes, destaca-se o aluno 07 que apresentou o maior salto de qualidade na escrita e na argumentação de modo geral do primeiro período para o segundo.

Entendemos que este aspecto pode estar relacionado às implicações para o ensino dos conceitos oriundas da nossa análise sobre o desenvolvimento conceitual apresentado pelos estudantes que cursaram a disciplina no período 2015.2. Portanto, somos levados a inferir que as contribuições desta pesquisa podem resultar em estratégias metodológicas efetivas para o ensino do modelo atômico quântico como um todo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao justificarmos a relevância deste trabalho para o meio acadêmico, o fizemos a partir de quatro premissas, a saber: o ensino do modelo atômico quântico, considerado o mais atual, está de acordo com o que se considera como objetivo da escola; os documentos oficiais que orientam a educação escolar brasileira indicam que o ensino do modelo atômico quântico é apropriado para o ensino médio nas disciplinas Química e Física; a compreensão do modelo atômico quântico requer esclarecer o conceito de quantum de uma grandeza, ao passo em que se baseia na noção de dualidade onda-partícula; e nossa revisão da literatura indica que existem poucas investigações de ensino destes conteúdos. Podemos dizer que com este trabalho contribuímos para a discussão sobre o ensino do modelo atômico quântico, abordando esse tema pelo viés da formação inicial dos professores, pois entendemos que sua aprendizagem durante a formação poderá influenciar na sua prática docente no futuro, ecoando os efeitos desta pesquisa para futuras gerações de estudantes.

Neste sentido, partimos do objetivo de investigar como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum e dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico, para analisar, pelo emprego da linguagem escrita, indícios de apreensão dos aspectos constituintes dos conceitos estudados. Para tanto, nos fundamentamos teoricamente em quatro aspectos que consideramos essenciais ao alcance deste objetivo.

Primeiramente, buscamos na história da teoria quântica pelas ideias iniciais que levaram ao seu desenvolvimento, especialmente no que diz respeito ao conceito de quantização/quantum de uma grandeza. Neste sentido, após estudarmos as concepções de Planck e de Einstein — dois dos maiores nomes envolvidos nas investigações sobre problema do corpo negro, cuja solução deu origem à teoria quântica — chegamos à definição de quantum de uma grandeza como uma quantidade elementar da grandeza em foco, de modo que, grandezas cujos valores são discretos, descontínuos em relação aos demais, são ditas quantizadas. Além disso, entendemos que esta é uma propriedade específica dos sistemas quânticos, os quais devem pertencer aos níveis atômico-molecular e subatômico. Foi também com bases nestas concepções que pudemos compreender o fenômeno do efeito fotoelétrico — emissão de elétrons por meio da iluminação de corpos sólidos — como consequência da ideia de que a luz incidente seria composta por quanta de energia.

O segundo aspecto da nossa fundamentação teórica esteve relacionado com o segundo conceito que pesquisamos neste trabalho, a dualidade onda-partícula. Investigamos nas

publicações de Louis De Broglie, sua concepção original, bem como a cadeia de raciocínios que o levou a atribuir comportamento de onda às partículas, dando início às discussões sobre o comportamento dual das ondas e das partículas. Percebemos que este novo entendimento deu origem também a um embate filosófico sobre a natureza deste comportamento dual e sobre a que se refere a Teoria Quântica como um todo. Em nosso texto, indicamos que entendemos o conceito de dualidade onda-partícula como propriedade de sistemas quânticos, como os átomos e a luz, que apresentam, em algumas situações, comportamento de partícula e, em outras, comportamento ondulatório, sendo que esta visão se aproxima da interpretação da complementaridade.

O terceiro aspecto da nossa fundamentação teórica defende e justifica o ensino do modelo atômico quântico, ao mesmo tempo em que promove também a importância de uma abordagem mais específica desse tema na formação dos professores de Química. Ficou claro que a falta de uma fundamentação teórica no conteúdo específico da área, ou insuficiências neste aspecto no momento da formação inicial do professor, muito provavelmente irá repercutir na sua prática docente, fato evidenciado muitas das vezes pela limitação aos conteúdos conforme aparecem nos livros didáticos e pela propagação de metodologias características do ensino tradicional.

Além disso, respondemos à seguinte pergunta: como discutir a origem e o desenvolvimento dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula com alunos da graduação contribui para fundamentar teoricamente sua compreensão sobre o modelo atômico quântico? Destacamos que estes conceitos são fundamentais ao desenvolvimento deste modelo atômico, constituindo dois dos cinco aspectos apresentados por Silva e Cunha (2005) constituintes de um sistema quântico como um átomo.

Por fim, o quarto elemento da nossa fundamentação teórica estabeleceu nossas categorias de análise. Para tanto, interpretamos os cinco aspectos do conceito segundo Hardy-Vallée — invariante, critério, organização, função e aquisição e formato — em conjunto com alguns dos fundamentos da teoria histórico-cultural de Vigotski. De modo geral, entendemos aprendizagem como a aquisição de um conceito e de desenvolvimento conceitual como um processo complexo que envolve um conjunto de aprendizagens relacionadas entre si e referentes ao emprego do conceito. A partir da discussão que foi desenvolvida sobre estes aspectos, concluímos que a investigação sobre a apreensão por estudantes dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula deve analisar a linguagem empregada na aplicação deste conceito em determinados contextos, quer esta utilização esteja adequada cientificamente, quer não. Tal análise buscou identificar pela decomposição dos textos elaborados pelos estudantes na resolução de questões sobre o conteúdo se o indivíduo demonstrou indícios da

apreensão dos conceitos dentro das relações sistemáticas da qual fazem parte e se sabe usar a linguagem científica adequadamente na necessidade de aplicar tais conceitos na resolução de situações-problema.

Na análise realizada para obtenção de dados de pesquisa, buscamos responder à seguinte questão: como estudantes do curso de Química adquirem e desenvolvem os conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula associados ao modelo atômico quântico? Para tanto, selecionamos uma turma da disciplina Química Quântica, a qual necessariamente deve abordar estes conteúdos e consta como disciplina obrigatória do curso de licenciatura em Química da UFBA.

Buscando responder a essa pergunta, procuramos entender através das respostas dos estudantes às quatro questões da primeira avaliação da disciplina como eles relacionam os seguintes aspectos referentes aos nossos conceitos pesquisados:

A) Sobre o conceito de quantum de uma grandeza — As características necessárias à definição de um sistema quântico; quantização como variação descontínua dos valores de uma propriedade qualquer do sistema; análise da variação de valores de uma propriedade empregando o conceito de quantização; aplicação do modelo corpuscular à luz segundo os princípios da teoria quântica; o processo de emissão de elétrons por efeito fotoelétrico; o significado dos termos da equação para a energia cinética do elétron emitido pela interação com a luz ($E_c = h\nu - \phi$); a relação entre a frequência da luz incidente, a energia do fóton e a velocidade de emissão do elétron; a independência entre a intensidade da luz incidente e a velocidade de emissão do elétron; e a relação entre a intensidade da luz incidente e a quantidade de fótons e elétrons emitidos.

A partir da análise das respostas às questões 1 a 3 da avaliação, identificamos alguns elementos de destaque no processo de aquisição e desenvolvimento deste conceito.

Primeiramente, a aquisição conceitual das características essenciais à definição de um sistema como quântico, requer esclarecer a necessidade de ambos os critérios: ser microscópico e apresentar variação descontínua para pelo menos uma das suas propriedades. Uma quantidade significativa dos alunos não considerou necessário explicar o porquê de um sistema quântico como um átomo atende ao critério de ser microscópico e/ou entenderam que a variação descontínua ocorre segundo números inteiros para a propriedade energia do sistema.

A aplicação do modelo corpuscular da luz na explicação do processo do efeito fotoelétrico aparentemente é uma construção teórica inteligível à maioria dos alunos.

O entendimento sobre os dois termos da equação para a velocidade de emissão do elétron pelo efeito fotoelétrico gerou dificuldade em mais da metade dos participantes, indicando que

até aquele momento não havia clareza sobre o significado do termo $h\nu$ enquanto energia de um único fóton e não do feixe de luz como um todo, sobre o significado da função trabalho, a distinção entre os conceitos físicos força, energia e trabalho, bem como, sobre a aplicação do princípio da conservação da energia na formulação desta equação.

Sobre a relação entre a frequência da luz incidente, a energia do fóton e a velocidade de emissão do elétron, o principal equívoco diz respeito à confusão conceitual entre energia e frequência.

Sobre a compreensão das relações entre intensidade da luz e a quantidade de fótons incidentes e da independência entre a intensidade da luz e a velocidade de emissão do elétron, os estudantes que adquiriram o conceito de luz segundo o modelo corpuscular, de modo geral conseguiram eficazmente estabelecer a organização conceitual necessária.

Por sua vez, destes aspectos que inferimos sobre a aquisição e desenvolvimento dos conceitos, derivamos as primeiras implicações para o ensino dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula:

- I. Trabalhar melhor a articulação entre o emprego do conceito e sua justificativa, de modo a dar-lhe maior cientificidade.
- II. Tornar mais explícito que sistemas quânticos são microscópicos (ou submicroscópicos), no sentido de serem não sensíveis.
- III. Estabelecer mais fortemente a sinonímia entre os adjetivos quântico, quantizado, descontínuo e discreto.
- IV. Chamar a atenção para o fato de que a quantização pode se referir a qualquer grandeza.
- V. Demonstrar que a quantização não está vinculada, apenas, a grandezas cujos valores são múltiplos inteiros de um valor mínimo.
- VI. Na descrição do processo do efeito fotoelétrico, ressaltar que a ocorrência deste fenômeno num determinado experimento é apenas uma ilustração e não uma imposição à sua ocorrência.
- VII. Esclarecer o entendimento sobre os termos da equação para a velocidade de emissão do elétron pelo efeito fotoelétrico.
- VIII. Destacar que o significado do termo $h\nu$ se refere à energia de um fóton e não do feixe de luz como um todo.
- IX. Sobre o significado da função trabalho, ressaltar a distinção entre os conceitos físicos de força, energia e trabalho, indicando qual destes está de fato relacionado a este termo.

- X. Destacar a aplicação do princípio da conservação da energia na formulação da equação para a energia cinética do elétron emitido por efeito fotoelétrico.
- XI. Explicar a definição de intensidade da luz segundo o modelo corpuscular, como forma de superação da ideia apresentada por muitos de que a intensidade da luz não influencia na velocidade dos elétrons porque não aparece dos termos da equação.
- XII. Metodologicamente: incrementar a discussão entre professor e estudantes; aumentar a quantidade de exercícios a serem resolvidos pelos estudantes e *discutidos em sala de aula*; desenvolver as discussões de modo a estimulá-los à maior participação.

No que diz respeito ao segundo conceito fundamental a esta pesquisa, também destacamos os principais aspectos que buscamos como indícios sobre sua aquisição e desenvolvimento, bem como as implicações para o ensino que resultaram desta análise.

B) Conceito de dualidade onda partícula — entender dualidade onda-partícula como propriedade de sistemas quânticos, como os átomos, elétrons e a luz; comportamento dos sistemas quânticos como corpuscular em alguns fenômenos e ondulatório noutros, de acordo com a interpretação da complementaridade; o desenvolvimento da construção do conceito por De Broglie e as relações entre equações para chegar à sua formulação principal ($h\nu = mc^2$); os termos da equação proveniente da interpretação da equação De Broglie para as partículas ($\lambda = h/p$) e porque esta equação implica em atribuir comportamento de onda a uma partícula.

A partir da análise da quarta questão da avaliação, fica evidente primeiramente que a aquisição do conceito de dualidade onda-partícula é essencial para fundamentar a solução de qualquer problema que envolva a atribuição de comportamento de partícula e de onda a um mesmo sistema, como na situação em que se requer o cálculo de um comprimento de onda para um elétron.

Outro destaque da análise dessa questão diz respeito ao elevado número de estudantes que não a responderam. Para além do fator tempo para responder a toda a avaliação, acreditamos que uma possível dificuldade de compreensão do enunciado e das grandezas envolvidas, tenham se configurado como possível agente desse resultado.

Dentre os participantes que resolveram a questão, apenas 10% partiu da relação de De Broglie ($p = h/\lambda$), o que consideramos como principal indício sobre a baixa apreensão do conceito de dualidade onda-partícula, uma vez que esta equação é uma consequência do desenvolvimento teórico do conceito de dualidade. Por sua vez, os demais participantes se

enquadram entre os que apresentaram o mais presente equívoco de organização conceitual, que foi a ausência desta equação na resolução.

Os demais aspectos necessários à resolução da questão — utilizar a relação citada no enunciado entre energia cinética e voltagem e executar os cálculos corretamente — não estão relacionados diretamente ao conceito de dualidade onda-partícula, mas dizem muito sobre o processo de aprendizagem desse grupo de estudantes. Podemos dizer isso porque estes equívocos de organização conceitual e de matemática poderiam ter sido superados pela resolução de exercícios, os quais exigem tanto a interpretação de texto quanto, a realização de cálculos. Isto é, mesmo com todos os dados e informações contidas no enunciado, nenhum dos alunos alcançou o resultado esperado, até mesmo os que ao menos partiram da equação correta para desenvolver o raciocínio.

A partir de mais outros aspectos sobre a aprendizagem dos nossos conceitos pesquisados, extraímos mais implicações para seu ensino, a saber:

- XIII. O estudo sobre o desenvolvimento histórico do conceito deve ocorrer no sentido de promover uma maior compreensão sobre o significado físico da sua formulação e das equações envolvidas.
- XIV. A compreensão sobre a cadeia de raciocínios que levam à formulação da equação de De Broglie para as partículas pode ser relevante para que o estudante tenha segurança em utilizá-la na resolução de problemas, especialmente quando se requer aliar propriedades de onda e de partícula a um mesmo sistema.
- XV. Destacar as grandezas físicas envolvidas e suas unidades de medida, bem como suas relações e conversões matemáticas.

Finalizando estas considerações sobre os resultados da pesquisa, temos ainda o caso dos quatro alunos que foram reprovados, mas que repetiram a disciplina no semestre seguinte com o mesmo professor. Como base para comparação do desenvolvimento inicial desse grupo, analisamos suas resoluções para uma mesma questão nesses dois períodos.

Das análises do desenvolvimento destes quatro alunos, concluímos que em todos os casos houve melhoras na abordagem do conceito requerido, indicando que nesse processo ampliou-se o entendimento do invariante — observado através da identificação dos critérios — o estabelecimento das relações numa organização sistemática e, conseqüentemente, sua aquisição. Dentre estes, destaca-se o aluno 07 que apresentou o maior salto de qualidade na escrita e na argumentação de modo geral do primeiro período para o segundo.

Este resultado pode apontar para pelo menos duas possibilidades: na repetição da disciplina, os estudantes já adquiriram uma noção maior da necessidade de se compreender

esses conceitos iniciais para a apreensão do modelo atômico quântico, abordado posteriormente na disciplina; o professor, ao perceber equívocos e dificuldades apresentadas pelo grupo anterior de estudantes, na execução da segunda turma, buscou abordagens mais efetivas. Obviamente, outros aspectos podem ter influenciado nesta melhoria, como: resolução de exercícios, mais tempo dedicado aos estudos, refacção das avaliações anteriores, modificação do turno da disciplina e metodologias utilizadas pelo professor.

Sobre a pesquisa como um todo, concluímos que a mesma foi eficaz no alcance do objetivo pretendido. Os dados aqui descritos e interpretados nos fornecem informações importantes sobre o processo de desenvolvimento dos conceitos de quantum de uma grandeza e de dualidade onda-partícula e, conseqüentemente, sobre os aspectos que devemos considerar no processo de ensino dos mesmos, se quisermos que estes colaborem para uma maior compreensão sobre o modelo atômico quântico, o qual consideremos fundamental à formação de professores.

Como possibilidade de ampliarmos estes resultados de modo que reverberem no ensino do modelo atômico quântico tanto na formação inicial de professores, como também no ensino médio, apontamos para a perspectiva de elaborarmos e aplicarmos sequências didáticas para ambas as esferas de ensino. Isto porque a partir dos resultados aqui obtidos, podemos prever e elaborar metodologias para superar os principais entraves teóricos para a aquisição e desenvolvimento destes conceitos, promovendo um ensino mais eficaz e duradouro.

REFERÊNCIAS

- BALL, David W.. **Físico-Química**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. 1 v.
- BOGDAN, Robert C.; BIKLEN, Sari Knopp. **Investigação Qualitativa em Educação: Uma introdução à teoria e aos métodos**. Porto: Porto Editora, 1994.
- BRASIL. Secretária de Educação Média e Tecnológica – Semtec. **PCN + Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: Ministério da Educação, Secretária de Educação Média e Tecnológica, 2002.
- BRASIL. Secretaria de Educação Básica. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Volume 2. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria da Educação Básica, 2006.
- BROCKINGTON, José Guilherme de Oliveira. **A realidade escondida: A dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio**. 2005. 268 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BROGLIE, Louis de. Waves and Quanta. **Nature**, [S.l.], v. 112, n. 2815, p.540-540, out. 1923a.
- BROGLIE, Louis de. **Nobel Lecture: The Wave Nature of the Electron**. 1929. Nobel Media AB 2014. Disponível em:
<https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-lecture.html>. Acesso em: 01 dez. 2017.
- CARVALHO, Anna Maria Pessoa de; GIL-PÉREZ, Daniel. **Formação de professores de ciências: tendências e inovações**. 3. ed. São Paulo: Cortez, 1998. (Coleção questões da nossa época). Tradução de Sandra Valenzuela.
- CARVALHO, Silvia Helena Mariano de. **Einstein: Uma luz sobre a luz**. São Paulo: Usp, 2005. (Ano Internacional da Física).
- CARVALHO, Virgínia Donizete de; BORGES, Livia de Oliveira; RÊGO, Denise Pereira do. Interacionismo simbólico: Origens, pressupostos e contribuições aos estudos em Psicologia Social. **Psicologia: Ciência e Profissão**, [S.l.], v. 30, n. 1, p.146-161, 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1414-98932010000100011>. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-98932010000100011>. Acesso em: 01 nov. 2017.
- CASTRO, Thiago S.; CAVALCANTE, Eduardo Luiz Dias. Números Quânticos: evolução ou involução do conteúdo nos livros didáticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 18., 2016, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Sbcq, 2016. p. 1 - 11. Disponível em:
<<http://www.eneq2016.ufsc.br/anais/busca.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2017.
- CROTTY, Michael. **The foundations of social research: Meaning and perspective in the research process**. London: Sage, 1998.
- EINSTEIN, Albert. Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e da transformação da luz. In: STACHEL, John (Org.). **O ano miraculoso de Einstein: Cinco artigos que mudaram a face da Física**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Ufrj, 2005. p. 201-222. Tradução de Alexandre Carlos Tort.

FIGUEIRA, Rafael; PIERSON, Alice Helena Campos. A inserção de Física Moderna e Contemporânea na educação básica: Uma análise sobre a consonância das justificativas com as atuais propostas curriculares. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 9., 2013, Águas de Lindóia. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2014. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/trabalhos.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

GRECA, Ileana Maria; FREIRE JUNIOR, Olival. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? **Science And Education**, [s.l.], v. 12, n. 5/6, p.541-557, 2003. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1025385609694>.

HARDY-VALLÉE, Benoit. **Que é um conceito?** São Paulo: Parábola, 2013. 128 p. Tradução de Marcos Bagno.

KIKUCHI, Ligia Ayumi; ORTIZ, Adriano José; BATISTA, Irinéa de Lourdes. Ensino de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: uma análise do que se tem discutido a respeito do assunto. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 9., 2013, Águas de Lindóia. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2014. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/trabalhos.htm>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

LIMA, Márcio Matos; SILVA, José Luis de Paula Barros. Um sistema de conceitos para o ensino de orbital atômico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 18., 2016, Florianópolis. **Anais...**. Florianópolis: Sdq, 2016. p. 1 - 9. Disponível em: <<http://www.eneq2016.ufsc.br/anais/busca.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

LUZ, Wagner Manço da; HIGA, Ivanilda. As pesquisas em Ensino de Física Moderna e o Papel do Professor na Construção de Conhecimentos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 9., 2013, Águas de Lindóia. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2014. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/ixenpec/atas/trabalhos.htm>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

MARTINS, Roberto de Andrade; ROSA, Pedro Sergio. **História da Teoria Quântica: A dualidade onda-partícula de Einstein a De Broglie**. São Paulo: Livraria da Física, 2014. 292 p.

MAX Planck - Facts. 2014. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1918/planck-facts.html>. Acesso em: 10 maio 2018.

MELHORATO, R. L.; NICOLI, G. T. . Da física clássica à moderna: o simples toque de uma sirene. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 34, n. 3, p. 3311-1-3311-4, Set. 2012. Disponível em: < <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/343311.pdf> >. Acesso em: 27 mar. 2016.

MILLIKAN, Robert A.. **Nobel Lecture: The electron and the light-quant from the experimental point of view**. 1924. Nobel Media AB 2014. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.html>. Acesso em: 01 dez. 2017.

MORAIS, A. V.; GUERRA, A. . História e a Filosofia da Ciência: caminhos para a inserção de temas Física Moderna no estudo de energia na primeira série do Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 35, n. 1, p. 01-09, Mar. 2013. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n1/v35n1a18.pdf> > Acesso em: 27 mar. 2016

MOURA, S. L.; SILVA, F. I.; SILVA, F. C. M.; SANTOS, J. A. V. Constante de Planck: Uma nova visão para o ensino médio. **Química Nova na Escola**. v. 33, n. 4, p. 246-251, Nov. 2011. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc33_4/246-EEQ-6011.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2016.

NUSSENZVEIG, Herch Moyses. **Curso de física básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 3v.

PAIS, Abraham. **'Sutil é o Senhor...': A ciência e a Vida de Albert Einstein**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982. 637 p. Tradução de Fernando Parente e Viriato Esteves.

PAGLIARINI, Cassiano Rezende; ALMEIDA, Maria José P. M. de. Leituras por alunos do ensino médio de textos de cientistas sobre o início da física quântica. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 22, n. 2, p.299-317, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v22n2/1516-7313-ciedu-22-02-0299.pdf>>. Acesso em: 02 jun. 2017.

PEREIRA, Alexsandro P.; OSTERMANN, Fernanda. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: Uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 14, n. 3, p.393-420, dez. 2009. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/349>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

PESSOA JUNIOR, Osvaldo Frota. O Início da Física Quântica e seus Caminhos Possíveis. In: PIETROCOLA, Maurício; FREIRE JUNIOR, Olival (Org.). **Filosofia, Ciência e História: Michel Paty e o Brasil, uma homenagem aos 40 anos de colaboração**. São Paulo: Discurso, 2005. p. 87-113.

PIMENTA, Natália; RODRIGUES, Maria Inês Ribas. Física Moderna no Ensino Médio: Uma proposta para implementação do tópico dualidade onda-partícula. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 10., 2015, Águas de Lindóis. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2015. p. 1 - 11.

Disponível em: <<http://www.abrapecnet.org.br/enpec/x-enpec/anais2015/busca.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

RAMOS, Lucilene Correia. **Uma análise das noções de quantum de uma grandeza e de comportamento dual da energia e da matéria no ensino do modelo atômico quântico em livros didáticos de química para o ensino médio**. 2012. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

RAMOS, Lucilene Correia; SILVA, José Luis de Paula Barros. Modelo quântico do átomo: uma análise do ensino das noções de quantum de uma grandeza e comportamento dual da energia e da. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 16., 2012, Salvador. **Anais...**. Salvador: Ufba, 2012. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.eneq2012.qui.ufba.br/modulos/submissao/Upload/43124.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

RAMOS, Lucilene Correia; SILVA, Juliel Cerqueira da; SILVA, José Luis de Paula Barros. Modelo atômico quântico em coleções de química aprovadas no PNLD 2015. Parte I: quantum de energia, dualidade onda-partícula e números quânticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 10., 2015, Águas de Lindóia. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2016. p. 1 - 8. Disponível em: <<http://www.abrapecnet.org.br/enpec/x-enpec/anais2015/busca.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

RIBEIRO FILHO, Aurino. Os Quanta e a Física Moderna. In: ROCHA, José Fernando Moura (Org.). **Origens e Evolução das Idéias da Física**. Salvador: Edufba, 2002. p. 301-372.

ROSA, Pedro Sergio. **Louis de Broglie e as ondas de matéria**. 2004. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Física, Unicamp, Campinas, 2004. Disponível em: <<http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/apresentacao.php?filename=IF717>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

SANTOS, Paulo Vicente Moreira dos. **O itinerário científico de Louis de Broglie em busca de uma interpretação causal para a mecânica ondulatória**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

SCHROEDER, Edson. Conceitos Espontâneos e Conceitos Científicos: O processo da construção conceitual em Vygotsky. **Atos de Pesquisa em Educação**, Blumenau, v. 2, n. 2, p.293-318, maio 2007. Disponível em: <<http://proxy.furb.br/ojs/index.php/atosdepesquisa/article/view/569/517>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT JUNIOR, John W.. **Princípios de Física: Óptica e Física Moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1992. 4 v.

SFORNI, Marta Sueli de Faria. **Aprendizagem conceitual e organização do ensino**: Contribuições da teoria da atividade. Araraquara: Junqueira & Marin, 2004. 200 p.

SILVA, L. F.; ASSIS, A. Física Moderna no Ensino Médio: um experimento para abordar o efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 29, n. 2, p. 313-324, Ago. 2012. Disponível em: < <http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-941.2012v29n2p313/22920> >. Acesso em: 27 mar. 2016.

SILVA, Geilson Rodrigues da; CHAGAS, Edvanio. Percepção docente sobre o ensino de Química Quântica no curso Técnico Integrado em informática. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 10., 2015, Águas de Lindóia. **Atas**. Águas de Lindóia: Abrapec, 2016. p. 1 - 8.

Disponível em: <<http://www.abrapecnet.org.br/enpec/x-enpec/anais2015/busca.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SILVA, Geilson Rodrigues da; CHAGAS, Edvanio. A Química e a Educação Profissional: Estabelecendo interfaces para o ensino de números quânticos por meio de uma sequência didática no curso técnico integrado em informática. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 18., 2016, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: SBQ, 2016. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.eneq2016.ufsc.br/anais/busca.htm>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

SILVA, José Luis de Paula Barros; CUNHA, Maria Bernadete M. Para compreender o modelo atômico quântico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 14., 2008, Curitiba. **Anais...** . Curitiba: UFPR/SBQ, 2008. p. 1 - 12. CD-ROM.

SILVA, Juliel Cerqueira da; SILVA, José Luis de Paula Barros. O sistema conceitual dos números quânticos. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 18., 2016, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: Sdq, 2016. p. 1 - 1. Disponível em: <<http://www.eneq2016.ufsc.br/anais/busca.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2017.

THE Nobel Prize in Physics 1937. 2014. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/>. Acesso em: 01 dez. 2017.

VIGOTSKI, Liev Semionovitch. **A Construção do Pensamento e da Linguagem**. 2. ed. São Paulo: Wmf Martins Fontes, 2009. 520 p.

ANEXO A

QUIA49 - QUÍMICA QUÂNTICA I

PLANO DE CURSO 2016.1

EMENTA

Fundamentos teórico-experimentais da teoria quântica: quantum de uma grandeza; dualidade onda-partícula; números quânticos; equação de Schrödinger; relações de incerteza; interpretação probabilística da teoria quântica. Átomo de hidrogênio e modelo atômico de orbitais. Átomos multieletrônicos: funções de onda e configurações eletrônicas.

OBJETIVOS (das DCN para os Cursos de Química).

Os estudantes deverão:

Explicar a Química como uma construção humana, compreendendo os aspectos sociohistóricos de sua produção.

Explicar as contribuições de conceitos da teoria quântica para a elaboração do modelo atômico.

Explicar conceitos e fenômenos físico-químicos referentes à estrutura atômica.

Os objetivos específicos relativos a este objetivo geral, por serem numerosos, estão listados abaixo, junto aos conteúdos, para sua melhor compreensão.

Desenvolver a leitura e a interpretação de textos didáticos e/ou científicos em idioma vernáculo e estrangeiro.

Ler, compreender e interpretar textos didáticos e/ou científicos em língua portuguesa, espanhola e inglesa.

Elaborar resumos e resolver exercícios e problemas relativos à disciplina em linguagem oral e escrita.

Desenvolver o uso e a interpretação de diferentes formas de representação em química (tabelas, gráficos, símbolos, expressões matemáticas, etc.).

Representar grandezas físico-químicas matematicamente, de modo justificado.

Realizar e explicar cálculos de grandezas físico-químicas, empregando derivadas e integrais.

Construir gráficos de funções em coordenadas cartesianas e polares planas e esféricas.

Desenvolver a comunicação dos conhecimentos aprendidos em linguagem adequada e correta, em forma oral e escrita.

Elaborar resumos e resolver exercícios e problemas relativos à disciplina em linguagem oral e escrita.

Empregar terminologia científica adequada.

Empregar a norma culta da língua portuguesa.

Distinguir expressão oral e escrita.

Desenvolver relacionamento cooperativo e respeitoso com os colegas.

Criticar o ensino da disciplina, de modo a contribuir para a sua melhoria.

Participar das discussões em sala de aula criticando as posições apresentadas.

Receber críticas dos colegas às suas posições.

Estudar em grupo, de modo a cada um auxiliar o outro na compreensão dos conteúdos.

METODOLOGIA DE ENSINO

O ensino buscará discutir os conceitos e suas relações, a fim de facilitar aos alunos a captação dos significados da teoria quântica relativos aos átomos. Para tanto, serão empregadas aulas expositivas, discussões em grupo, exercícios.

A discussão sobre a natureza dos objetos quânticos merecerá especial atenção, assim como a necessária articulação entre conteúdos de química, física e matemática.

A frequência será computada pelos horários de chegada e de saída das aulas. O mínimo de frequência é 75% das aulas.

A atribuição de notas aos alunos far-se-á através de avaliações de aprendizagem, a serem realizadas em datas previamente combinadas entre professor e alunos, no horário das aulas teóricas. Datas propostas: 11/8, 15/9 e 20/10.

Será computada como Atividade Extraclasse a realização de exercícios. Os estudantes serão solicitados a entregar parte dos exercícios resolvidos, em forma escrita, correspondendo a 20% da nota final de cada avaliação. Os estudantes deverão ter todos os exercícios propostos realizados e prontos para entrega, pois, os exercícios a entregar serão indicados no momento do recebimento, apenas.

As avaliações de aprendizagem serão compostas por questões que deverão ser respondidas de modo escrito. Considerar-se-á que houve aprendizagem quando os estudantes atingirem os objetivos apresentados.

Não se aceitará a mera reprodução de trechos da bibliografia que se encontre relacionados aos enunciados das questões propostas: isso não mostra a compreensão dos estudantes, mas sim, as compreensões dos autores dos textos e que os estudantes souberam localizar os conteúdos solicitados na bibliografia. Isso é apenas uma parte do trabalho de aprendizagem.

O que mostrará a compreensão dos conteúdos por parte dos estudantes será a apresentação dos conteúdos estudados com suas próprias palavras e sua utilização em situações um tanto diferentes daquelas em que foi ensinado. As questões exigirão que saiba articular as ideias estudadas e produzir um texto escrito de sua lavra.

No intuito de verificar se houve aprendizagem e os objetivos foram cumpridos, as respostas às questões das avaliações serão analisadas de acordo com os seguintes critérios, quando pertinentes:

- Coerência entre a resposta e o enunciado de cada questão.
- Correção dos conceitos e suas relações.
- Correção da linguagem, técnica e gramaticalmente.
- Argumentação adequada e coerente.
- Adequação das equações.
- Correção das equações.
- Correção das unidades das grandezas físico-químicas.
- Correção dos cálculos.

BIBLIOGRAFIA

- BALL, D. W. Físico-Química. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005. v.1.
CRUZ, D.; CHAMIZO, J.; GARRITZ, A. Estructura Atómica: un enfoque químico. Wilmington, USA: Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.
Textos elaborados e disponibilizados pelo professor.
Outros textos complementares.

Sítios na web:

THE ORBITRON: a gallery of atomic orbitals and molecular orbitals on the WWW.

Disponível em: <http://winter.group.shef.ac.uk/orbitron/>

ATOMIC ORBITALS. Disponível em: <http://www.orbitals.com/orb/>

CONTEÚDOS E OBJETIVOS ESPECÍFICOS**Introdução**

Explicar o modelo atômico de orbitais como resultante de uma articulação de vários conceitos elaborados em um período de três décadas, aproximadamente.

Quantum de uma grandeza; sistema quântico.

Explicar o significado do termo quântico como descontínuo, discreto.

Conceituar sistema quântico.

Utilizar o conceito de sistema quântico para identificar se sistemas físico-químicos são quânticos ou não.

Explicar a contribuição inicial de Planck para a teoria quântica como a introdução da descontinuidade de valores de energia em sistemas físicos e a proposição da quantidade elementar de energia — diferença entre os valores de energia descontínuos — como: $\varepsilon = hv$.

Dualidade onda-partícula da radiação e da matéria

Descrever a experiência do efeito fotoelétrico e seus resultados.

Explicar porque os resultados da experiência do efeito fotoelétrico não são explicáveis pelo modelo ondulatório da luz.

Descrever o modelo quântico da luz proposto por Einstein.

Explicar os resultados da experiência do efeito fotoelétrico pelo modelo quântico da luz.

Conceituar quantum de energia.

Explicar a denominação fóton para quantum de energia luminosa.

Explicar caráter dual do fóton.

Explicar analogia entre “pacote” ou corpúsculo de energia e fóton.

Explicar comportamento ondulatório da radiação.

Explicar relação entre matéria e energia (radiação) proposta por De Broglie.

Deduzir relação entre momento linear e comprimento de onda e utilizá-la em cálculos.

Explicar como foi evidenciado experimentalmente o comportamento ondulatório da matéria.

Demonstrar, empregando a relação entre momento linear e comprimento de onda de um sistema, que a dualidade onda-partícula é característica dos sistemas quânticos.

Reconhecer a dualidade onda-partícula como uma limitação do conhecimento humano acerca dos fenômenos naturais.

Números quânticos

Explicar como Bohr introduziu a quantização do momento angular no modelo atômico.

Deduzir a quantização do raio da órbita e da energia no modelo atômico de Bohr.

Explicar os espectros de emissão e absorção de luz pelo modelo atômico de Bohr.

Calcular valores de energia para os diversos estados dos elétrons no modelo atômico de Bohr.
 Explicar a interpretação ondulatória das órbitas do modelo atômico de Bohr.
 Explicar como Sommerfeld reintroduziu a quantização do momento angular no modelo atômico.
 Explicar quais grandezas estão relacionadas aos números quânticos propostos por Sommerfeld.
 Explicar a relação entre número quântico e estado de um sistema.
 Explicar os sucessos do modelo de Bohr-Sommerfeld na explicação dos espectros atômicos, em relação ao modelo de Bohr anterior.

Equação de Schrödinger e função de onda de um sistema

Explicar a relação entre comportamento ondulatório da matéria e a equação de Schrödinger.
 Explicar a relação entre números quânticos e a equação de Schrödinger, no caso da partícula na caixa.
 Explicar a relação entre função de onda, número quântico e estado de um sistema quântico.
 Explicar as características necessárias a uma função de onda.

Relações de incerteza e interpretação probabilística da teoria quântica.

Explicar a impossibilidade de determinação da trajetória de um sistema quântico.
 Explicar como a relação de incerteza entre momento e posição implica na necessidade de modificação do modelo de Bohr-Sommerfeld.
 Calcular a incerteza de medições de posição e momento.
 Explicar a interpretação probabilística da função de onda solução da equação de Schrödinger.
 Calcular a probabilidade de encontrar um sistema quântico em dada região do espaço.
 Explicar as características necessárias a uma função de onda para que possa cumprir a interpretação probabilística.

Formalismo da teoria quântica (texto próprio).

Empregar corretamente a terminologia própria da álgebra linear utilizada na teoria quântica e explicar os significados dos termos: equação diferencial linear homogênea, combinação linear de funções, superposição de estados, independência linear, colapso da função de onda, redução da superposição de estados; vetor, espaço vetorial, álgebra linear; transformação linear, observável, operador, autovalor de operador, autovetor de operador, equação do autovalor ou do autovetor, operador hamiltoniano, comutador de operadores, valor médio de um observável.
 Reconhecer uma combinação linear de soluções da equação de Schrödinger como solução da mesma equação.
 Explicar uma superposição de estados como um conjunto de vários estados prováveis para o sistema.
 Explicar que a medição introduz uma perturbação que reduz a superposição de estados a um único estado.
 Explicar o conceito de vetor como elemento de um espaço vetorial.
 Explicar um vetor como representante do estado de um sistema.
 Explicar o conceito de operador em álgebra linear.
 Explicar conceito de autovalor de um operador.
 Explicar conceito de autovetor de um operador.

Reconhecer uma equação de autovalor (equação de autovetor).
 Reconhecer a equação de Schrödinger como uma equação de autovalor.
 Explicar porque para cada observável deve haver uma equação de autovalor.
 Explicar a analogia entre equação de autovalor e processo de medição.
 Explicar o conceito de observável.
 Reconhecer os operadores da posição, do momento, da energia potencial, da energia cinética e da energia total (hamiltoniano).
 Explicar o conceito de comutador de operadores.
 Explicar a relação entre comutação de operadores e incerteza da medição.
 Calcular relações de incerteza a partir do comutador de operadores.
 Explicar o conceito de valor médio de um observável.
 Calcular o valor médio de um observável.

Átomo de hidrogênio e modelo atômico de orbitais.

Reconhecer a complexidade da resolução da ES para o átomo de hidrogênio.
 Deduzir as expressões das soluções específicas da ES por substituição dos números quânticos nas expressões gerais.
 Calcular a energia de um elétron em dado nível de energia.
 Explicar as diferenças e as semelhanças entre os modelos atômicos de Bohr-Sommerfeld e o modelo atômico de orbitais.
 Conceituar de orbital como função de onda para um elétron em um átomo.
 Construir gráficos da parte radial e da parte angular (esféricos harmônicos) dos orbitais em coordenadas cartesianas e coordenadas polares esféricas.
 Explicar as interpretações probabilísticas da parte radial e da parte angular dos orbitais.
 Explicar o conceito de orbital como lugar do espaço.
 Calcular a probabilidade de encontrar o elétron em um volume definido (volume duma camada esférica de espessura Δr e em uma esfera de raio r).
 Calcular o valor mais provável da distância entre elétron e núcleo do átomo em dado nível de energia.
 Explicar a grandeza do raio atômico com base na probabilidade de encontrar o elétron a dada distância do núcleo.
 Explicar o conceito de hibridização de orbitais.
 Construir orbitais híbridos como combinações lineares de outros orbitais (linearmente independentes ou não).
 Relacionar orbitais híbridos com geometria molecular.
 Explicar as limitações da interpretação realista de orbital como lugar do espaço.

Átomos multieletrônicos: funções de onda e configurações eletrônicas.

Explicar as mudanças necessárias na equação de Schrödinger para sua aplicação a sistemas com mais de um elétron.
 Explicar o spin eletrônico.
 Explicar o método das perturbações para o cálculo da energia dos elétrons nos átomos.
 Explicar o método variacional para o cálculo da energia dos elétrons nos átomos.
 Explicar a distribuição energética dos estados eletrônicos em átomos multieletrônicos.

ANEXO B

QUANTUM DE UMA GRANDEZA E SISTEMA QUÂNTICO

José Luis P. B. Silva

O conceito de quantum de energia se originou do trabalho de Planck acerca da radiação do corpo negro (ver Ball, v. 1, seções 9.7 e 9.8, p. 253-259). Uma aproximação experimental ao corpo negro consiste de um forno — bloco de material cerâmico com cavidade, no qual foram embutidas resistências elétricas para aquecimento — aquecido e fechado: as paredes absorvem e emitem radiação entre si e, depois de algum tempo, o sistema entra em equilíbrio. A radiação inclui muitos comprimentos de onda e sua distribuição é função da temperatura, de modo que, a cor das paredes do forno (e/ou do seu conteúdo) pode ser um indicador da sua temperatura. O estudo dessa relação tem aplicações tecnológicas importantes, como a medição da temperatura em fornos siderúrgicos a partir do comprimento de onda preponderante na radiação.

O problema que Planck procurou resolver consistia em obter uma expressão que reproduzisse os dados experimentais de intensidade de energia emitida/absorvida pelo corpo negro em função do comprimento de onda da luz (ver Ball, Fig. 9.7, p. 255 e Fig. 9.8, p. 257). Em primeiro lugar, obteve uma expressão adequada por um procedimento simplificado [16]. Então, buscou deduzir a expressão obtida a partir da teoria existente. Nesta investigação, Planck elaborou um modelo para o corpo negro, no qual, suas paredes seriam constituídas por osciladores que emitiam e absorviam energia. A energia de cada oscilador era um múltiplo inteiro de uma “**parte elementar de energia**”,

$$\varepsilon = h\nu,$$

onde $h = 6,626.10^{-34}$ J.s (valor atual) é uma constante e ν é a **frequência** da radiação emitida/absorvida pelo oscilador. Desse modo, conseguiu realizar a dedução necessária para justificar a expressão que havia obtido anteriormente. (Uma tradução para o português do artigo original de Planck pode ser encontrada em Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 22, n. 4, p. 538-542, 2000; disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_538.pdf>.)

[16] Não vamos discutir os procedimentos realizados por Planck neste texto, porque exigiria uma gama de conteúdos que escapam ao seu objetivo, que é explicar como se originou o conceito de quantum de uma grandeza. Para tanto, cremos ser necessário e, didaticamente suficiente, apresentar a parte do trabalho de Planck que trata da descontinuidade da energia de um sistema.

Planck não tinha consciência de estar realizando uma revolução na física, como muitos textos didáticos afirmam. De fato, em uma carta escrita a um amigo, declarou haver realizado “um ato desesperado” porque “uma explicação teórica [da expressão obtida] teria de ser fornecida a todo custo, qualquer que fosse o preço” [17]. Portanto, Planck introduziu a descontinuidade da energia dos osciladores para que sua dedução chegasse ao resultado pretendido, uma espécie de artifício matemático, e não, uma concepção física acerca da distribuição da energia em um sistema.

Por outro lado, conta Heisenberg que, em algum momento posterior, Planck teria se dado conta da importância de seu trabalho e confessado ao filho que “acreditava ter feito uma descoberta de primeira grandeza, comparável talvez somente às descobertas de *Sir Isaac Newton*” [18].

Alguns anos depois, a “parte elementar de energia” concebida por Planck, foi identificada como um **quantum de energia** [19]. Quantum significa quantidade, em latim, de modo que, podemos definir um quantum de energia como uma quantidade elementar de energia. Sendo elementar, tal quantidade não pode ser decomposta, dividida. Segundo essa interpretação, a energia de cada oscilador constituinte do corpo negro é composta por vários **quanta (plural de quantum)** de energia, ou seja: várias quantidades elementares de energia. Os **valores** de energia que um oscilador pode apresentar são **discretos, descontínuos** em relação aos valores anteriores e aos posteriores, sendo a diferença entre cada valor igual a um quantum de energia, ϵ , ou um múltiplo inteiro dessa quantidade elementar. Logo, a absorção e emissão de energia por um oscilador se daria por ganho ou perda de um ou mais quanta de energia, respectivamente.

O quantum de energia introduziu na física a ideia de que há sistemas cujos valores de energia são discretos, pois, até então, considerava-se que todos os sistemas apresentavam valores contínuos de energia. A energia é uma grandeza característica dos sistemas físico-químicos, entre outras. Podemos conceber que existam sistemas — além dos osciladores de Planck — nos quais a energia também apresente valores descontínuos; similarmente, podemos conceber que existam sistemas cujas grandezas características também exibam valores

[17] JAMMER, M. **The conceptual development of quantum mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1966. p. 22.

[18] HEISENBERG, W. Física e filosofia. 3. ed. Brasília: Editora da UnB, 1995. p. 30.

[19] A associação entre o quantum de energia e o trabalho de Planck constitui-se num anacronismo, pois o termo foi cunhado por Einstein, cinco anos depois, na sua interpretação do efeito fotoelétrico. Porém, a antecipação do emprego do termo **quantum** neste texto possibilita a definição de sistema quântico em sequência, de modo que, tal escolha constitui-se num ganho para o ensino da teoria quântica. De todo o modo, é pacificamente aceito entre os cientistas — embora não o seja entre historiadores — que o artigo de Planck foi o ponto de partida da teoria quântica.

descontínuos. Desse modo, podemos generalizar o conceito de quantum de energia para **quantum de uma grandeza** qualquer, definindo-o como uma **quantidade elementar da grandeza** em foco. Por exemplo: adiante, quando discutirmos o modelo atômico de Bohr, várias grandezas serão consideradas como tendo valores discretos: o momento angular, o raio da órbita eletrônica, a energia eletrônica. Grandezas cujos valores são discretos, descontínuos em relação aos demais, são ditas **quantizadas**. Nos osciladores de Planck, a energia é quantizada; no modelo atômico de Bohr, o momento angular, o raio e a energia são quantizados.

Em vista do exposto, definimos um **sistema quântico como um sistema que apresenta alguma propriedade quantizada**.

Tais sistemas pertencem aos **níveis atômico-molecular e subatômico**, da natureza. Sistemas que pertencem ao **nível molar, macroscópico**, não costumam apresentar quantização de suas propriedades.

ANEXO C

QUIA49 - QUÍMICA QUÂNTICA I - EXERCÍCIOS 1

1. Conceitue quantum de energia.
2. Conceitue quantum de momento angular.
3. Considere que um átomo exibe valores energia e de momento angular dados na tabela abaixo. Explique se este átomo é um sistema quântico ou não.

Energia (10^{19} J)			Momento angular (10^{34} J.s)	
E1	-21,8		L1	1,05
E2	-5,45		L2	2,10
E3	-2,42		L3	3,15

4. Os osciladores propostos por Planck como constituintes das paredes do corpo negro são sistemas quânticos? Justifique sua resposta.
5. Cada oscilador que constitui as paredes do corpo negro emite/absorve energia de modo descontínuo. Porém, o gráfico da intensidade de energia emitida/absorvida pelo corpo negro (como um conjunto de osciladores) em função do comprimento de onda da luz não é descontínuo. Como se pode explicar que a quantização da energia dos osciladores não implique numa descontinuidade dos comprimentos de onda da luz emitida/absorvida pelo corpo negro?