



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
CURSO DE QUÍMICA - LICENCIATURA

MARÍLIA DOS SANTOS MARINHO

**INVESTIGAÇÃO DA ICONICIDADE TEXTUAL NO USO DA OBRA ALICE NO
PAÍS DO QUANTUM PARA CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS SOBRE O
CONCEITO DE ELÉTRON**

Caruaru
2021

MARÍLIA DOS SANTOS MARINHO

**INVESTIGAÇÃO DA ICONICIDADE TEXTUAL NO USO DA OBRA ALICE NO
PAÍS DO QUANTUM PARA CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS SOBRE O
CONCEITO DE ELÉTRON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Química -
Licenciatura do Campus Agreste da
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE,
na modalidade de monografia, como requisito
parcial para a obtenção do grau de licenciada
em Química.

Área de concentração: Ensino de Química.

Orientador(a): Prof. Dr. João Roberto Ratis Tenório da Silva

Caruaru

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Marinho, Marília dos Santos.

Investigação da iconicidade textual no uso da obra Alice no País do Quantum para construção de significados sobre o conceito de elétron / Marília dos Santos Marinho - 2021.

91f.: il.;30 cm.

Orientador(a): João Roberto Ratis Tenório da Silva
TCC (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Química -
Licenciatura, 2021.

Inclui referências, apêndices.

1. Mecânica Quântica. 2. Elétron. 3. Teoria da Iconicidade Verbal. 4. Ficção. I.
Silva, João Roberto Ratis Tenório da II. Título.

540 CDD (22.ed.)

MARÍLIA DOS SANTOS MARINHO

**INVESTIGAÇÃO DA ICONICIDADE TEXTUAL NO USO DA OBRA ALICE NO
PAÍS DO QUANTUM PARA CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS SOBRE O
CONCEITO DE ELÉTRON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Química -
Licenciatura do Campus Agreste da
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE,
na modalidade de monografia, como requisito
parcial para a obtenção do grau de licenciada
em Química.

Aprovada em: 22/12/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. João Roberto Ratis Tenório da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra. Roberta Pereira Dias (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. João Eduardo Fernandes Ramos (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho aos meus pais, que nunca mediram esforços para investir na minha educação, aos meus avós maternos e a minha avó paterna, que sempre foram substância de
calmaria em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos vão para a minha família, que sempre me apoiaram durante a minha formação. Mesmo sem entender sobre como funciona a vida acadêmica, sempre se fizeram presentes, me guiando a acreditar que eu podia muito mais.

Nessa jornada, conheci muitas pessoas que levarei em meu coração por onde quer que eu vá. Pessoas que me mostraram que a alegria não estaria no ponto de chegada, mas em tudo aquilo que vivemos enquanto estamos no caminho. Mesmo que nem todas elas saibam disso, sem elas, tudo teria sido mais difícil.

Dentre essas pessoas, não poderia deixar de mencionar o agradecimento aos meus queridos professores, que são uma inspiração. Entre uma atividade e outra, trabalhos acadêmicos, mostraram que, para sermos bons professores, é também preciso sermos bons seres humanos.

Entorno de tudo isso, em mim habita um sentimento de gratidão à vida, pela alegria de estar vivendo e aprendendo mais e mais a cada dia. Se a vida acadêmica me transformou, espero poder, um dia, como profissional e humana, deixar, pouco a pouco, a minha transformação nela.

“A vida deve ser, para os melhores, um sonho que se recusa a confrontos” (PESSOA, 2021, p. 136).

RESUMO

Na ciência Química, temos o estudo da Mecânica Quântica, em que seu desenvolvimento rompeu com a configuração epistemológica que era atribuída ao comportamento de constituintes da matéria como o elétron. Com isso, é importante pensar como tipos de linguagens podem ser usadas para refletir a respeito da abstração de um universo subatômico. Através da Semiótica de Peirce, que discute as conexões entre signos como ícone, índice e símbolo, podemos considerar como as representações presentes nas relações estabelecidas nos textos didáticos podem contribuir para a formação de imagens mentais que possam auxiliar na construção do conhecimento. Durante um processo de semiose – produção de significados – as palavras em um texto podem funcionar como signos icônicos, sendo estes evocadores de imagens. A Teoria da Iconicidade Verbal fornece subsídio para analisar, por meio da investigação do diálogo entre uma estrutura textual e processos cognitivos, a construção de significados sobre um conceito científico. Para a exploração desses constituintes, pode-se pensar nos textos de ficção – apresentam elementos desafiadores da realidade, demandando o desenvolvimento da imaginação – para a aprendizagem de conceitos científicos. Diante disso, este trabalho teve por objetivo analisar, apoiando-se na Teoria da Iconicidade Verbal, como estudantes manipulam tipos de signos icônicos, considerando marcadores presentes em seus discursos, para a construção de significados sobre o conceito de elétron ao longo de uma intervenção didática, e identificar os níveis de iconicidade presentes no livro *Alice no País do Quantum* de acordo com a Teoria da Iconicidade Verbal. Tratando-se de uma pesquisa exploratória, realizada por meio de um estudo de caso e uma análise qualitativa, os dados foram construídos a partir da realização de uma oficina, de maneira remota, contando com a participação de estudantes do curso de Licenciatura em Química, da UFPE/CA, que tivessem ou não cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica. Nos resultados, pode-se observar que os níveis de iconicidade aparecem de forma concomitante nos discursos dos participantes sobre o conceito de elétron. A iconicidade textual no discurso ficcional da obra, possibilitou uma exploração da imaginação, que emergiu de um jogo de metáforas. Os participantes enxergaram obstáculos em pensar na dualidade associada ao elétron, segundo a Mecânica Quântica. A isso, pode-se pensar sobre os conhecimentos a respeito da natureza do elétron, que apareceram nos discursos dos participantes a partir da manipulação das iconicidades, construídos antes de ingressar no Ensino Superior.

Palavras-chave: Mecânica Quântica; elétron; Teoria da Iconicidade Verbal; ficção.

ABSTRACT

In chemistry science, we have the study of Quantum Mechanics, in which its development disrupted with the epistemological configuration that was attributed to the behavior of constituents of matter like the electron. With this, it's important to think about how types of languages can be used to reflect upon the abstraction of a subatomic universe. Through the Peirce Semiotic, that discusses the connections between signs like icon, index and symbol, we can consider how the representations on the relations established in the didactic texts can contribute to the formation of mental images that can assist in knowledge construction. During the process of semiosis - production of meanings - the words in a text can work as iconic signs, these being image evokers. The theory of Verbal Iconicity provides subsidy to analyse, through the investigation of the dialogue between a textual structure and cognitive process, the construction of meanings about a scientific concept. For the exploration of these constituents, one can think of fictional texts - they present challenging elements of reality, demanding the development of imagination - for the learning of scientific concepts. Therefore, this work aimed to analyse, based on the Verbal Iconicity Theory, as students manipulate types of iconic signs, considering markers present on its speeches, for the construction of meanings about the concept of electron along a didactic intervention, and identify the levels of iconicity present on the book *Alice in Quantumland* according to the Verbal Iconicity Theory. Being an exploratory research, carried out through a case study and a qualitative analysis, the data were built from the performance of a workshop, remotely, counting with the participation of students from the class of Licenciatura em Química, from UFPE/CAA, that had or hadn't attended the subject of Introduction to Quantum Chemistry. In the results, one can see that the levels of iconicity appear concomitantly in the participants' speeches about the concept of electron. The textual iconicity in the fictional speech of the work, enabled an exploration of imagination that emerged from a metaphorical game. The participants saw obstacles in thinking of the duality associated with the electron, according to Quantum Mechanics. To this, one can think about the natural knowledge of the electron, which appeared in the speeches of the participants from the manipulation of iconicities, built before entering Higher Education.

Key-words: Quantum Mechanics; electron; Verbal Iconicity Theory; fiction.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1	DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA E O CONCEITO DE ELÉTRON.....	17
3.1.1	Contribuições experimentais no desenvolvimento da Mecânica Quântica.....	18
3.1.2	Base filosófica para a Mecânica Quântica.....	24
3.1.3	O conceito de elétron.....	26
3.1.3.1	Aprendizagem do conceito elétron e sua relação com a Mecânica Quântica.....	38
3.2	UTILIZAÇÃO DE TEXTOS DE FICÇÃO PARA O ENSINO DE CONCEITOS CIENTÍFICOS.....	41
3.2.1	Alice no País do Quantum: a Mecânica Quântica através da metáfora de Alice.....	44
3.3	A SEMIÓTICA DE CHARLES PEIRCE E O ENSINO DE QUÍMICA.....	46
3.3.1	A Teoria da Iconicidade Verbal.....	47
4	METODOLOGIA.....	50
4.1	COLETA DE DADOS.....	51
4.2	ANÁLISE DE DADOS.....	51
4.2.1	Identificação dos níveis de iconicidade.....	52
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO.....	54
5.1	IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE ICONICIDADE TEXTUAL.....	54
5.1.1	Primeiro momento síncrono.....	55
5.1.1.1	Questionário 1.....	56
5.1.2	Questionário 2.....	59
5.1.3	Segundo momento síncrono.....	59
5.1.3.1	Questionário 3.....	64

5.2	MANIPULAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE SIGNOS ICÔNICOS E CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS: UMA SÍNTESE.....	66
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – PRIMEIRO MOMENTO SÍNCRONO E ASSÍNCRONO DA OFICINA.....	84
	APÊNDICE B – SEGUNDO MOMENTO SÍNCRONO DA OFICINA.....	86
	APÊNDICE C – FALAS DOS DOIS PARTICIPANTES COM A PRESENÇA DOS NÍVEIS DE ICONICIDADE.....	88
	APÊNDICE D – RECORTE DO TEXTO QUE ACOMPANHOU A ILUSTRAÇÃO DO MECÂNICO CLÁSSICO E DO MECÂNICO QUÂNTICO.....	90

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que o ser humano, como ser social, desenvolve-se ao longo de sua vida, desde o início da infância, até a fase adulta, estabelecendo comunicações no meio em que vive. E, quanto à comunicação, podemos destacar a fala como um tipo de linguagem. No que diz respeito à linguagem, Bruner (1961 apud VIGOTSKI, 2008) destaca um aspecto importante ao declarar a interiorização do diálogo exterior como um caminho que destina o poderoso instrumento da linguagem para exercer influência sobre o fluxo do pensamento.

Assim como tantos outros espaços comunicativos, a sala de aula caracteriza-se por ser um ambiente social, onde os sujeitos dialogam e trocam experiências uns com os outros. Destacando-se a figura do(a) professor(a), geralmente responsável por proporcionar maneiras de aprendizagem aos alunos, pode-se refletir como a utilização de uma determinada linguagem, no processo de ensino e aprendizagem de um determinado conteúdo, pode possibilitar a construção de caminhos para a aprendizagem. Considerando a Química como uma ciência abstrata, é importante destacar o que declara Wartha e Rezende (2011) sobre o conhecimento químico, ao dizer que este se constitui em sistemas formais interpretados, significando que os modelos teóricos, constituídos por um corpo de enunciados, adquirem conteúdo ao serem associados, indiretamente, a aspectos observáveis da realidade exterior.

Diante disso, dentro da ciência Química, podemos destacar o estudo da mecânica quântica. Para introduzirmos sobre o desenvolvimento dessa ciência, autores apontam que, no início da década de 1920, físicos teóricos puseram em discussão a necessidade do desenvolvimento de uma nova mecânica (MAHAN; MYERS, 1995). Diante dessa esfera do saber, podemos tomar a ideia de fenômenos e escalas da natureza que não podem ser observados (SILVA, 2010). Como parte da trajetória de estudos que culminaram no surgimento de novas questões na ciência, lembra-se de estudos sobre a matéria, o que constitui as coisas com as quais interagimos no mundo, que proporcionou, ao final do século XIX, um marco, devido aos inúmeros experimentos envolvendo a interação da radiação eletromagnética com a matéria (ALMEIDA; SANTOS, 2001). Dentre as ideias que foram cruciais para o desenvolvimento da ciência quântica, não se pode deixar de considerar conceitos como a quantização de energia e as propriedades corpusculares da radiação.

Para a estruturação dessa nova ciência, apresentou-se a necessidade de um redesenho dos fundamentos filosóficos para o conhecimento científico. O fato é que uma filosofia científica cunhada no experimentalismo validava uma visão materialista do mundo (SILVA, 2010). Se por um lado a mecânica clássica ressaltava uma ciência que pensava observar

somente o que fosse material, por outro lado a mecânica quântica evidenciou que, como declara Silva (2010), a experimentação estava limitada por determinadas fronteiras que só o pensamento poderia penetrar. Assim, tratamentos matemáticos e probabilísticos, que já faziam parte da ciência clássica, passaram, pouco a pouco, a ascender para uma nova configuração epistemológica de mundo.

Em função disso, sabe-se que, comumente, são adotados livros para servir de base no que diz respeito à aprendizagem dos conceitos químicos. Tais materiais são caracterizados por apresentarem textos, fórmulas, equações, entre outros aspectos carregados de uma linguagem química. No entanto, diante dessa realidade, é importante refletir sobre como a interação com a referida linguagem, em paralelo com a mediação do(a) professor(a), proporciona um ambiente com ferramentas que possibilitam a construção do conhecimento. Vale destacar que a abstração de um universo subatômico demanda a necessidade do uso de meios alternativos para possibilitar o estudo e a aprendizagem de tais conceitos.

Acreditamos ser importante pontuar que, considerando o que já falamos inicialmente sobre a pertinência das comunicações ao longo do desenvolvimento do ser humano, existem elementos a serem destacados quando tratamos da aprendizagem, sobretudo quando pensamos na aprendizagem de conceitos científicos. Para chegarmos ao lugar de reflexão sobre esses conceitos e a sua construção, precisamos pensar sobre o papel das palavras. Nessa instância, a palavra, como objeto de comunicação, é também substância de significados e interrelações, abrigando nessa interface a transformação em um signo mediador, que implica em generalizações entendidas como conceitos (SCHROEDER, 2007). Diante desse campo, levamos em conta o que nos diz Vygotsky (2001; 2004; 2005 apud SCHROEDER, 2007, p. 300) a respeito dos conceitos como “instrumentos culturais orientadores das ações dos sujeitos em suas interlocuções com o mundo e a palavra se constitui no signo para o processo de construção conceitual”. Com isso, não nos parece que a construção dos conceitos repousa sobre um solo de repetição de palavras, mas perpassa por uma via de um ato elaborado de pensamento, e que mostra como parte do seu arcabouço que a construção dos conceitos científicos aponta para um horizonte que se afasta de uma assimilação em forma pronta e se aproxima de uma produção (SCHROEDER, 2007). Isto posto, levamos em consideração, para este trabalho, a concepção vygotskyana de conceito.

Para dar enfoque aos problemas relacionados à abstração na Química, é importante dialogar sobre a utilização de representações e como estas podem ser usadas para expressar conceitos abstratos ou fenômenos. As representações aqui citadas estão presentes nas importantes relações estabelecidas em textos didáticos, com a finalidade de proporcionar

àqueles que interagem com eles o desenvolvimento de imagens mentais que possam auxiliar na construção do conhecimento. As relações estabelecidas nos diversos tipos de representações encontradas em livros podem ser descritas por meio da semiótica peirceana. Tais relações são embasadas por conexões entre signos, aos quais Peirce (2010 apud MARTINS, 2015) categoriza como ícone, índice e símbolo.

Quanto à atividade relacional das palavras com o processo de semiose, Simões (2009a) salienta sobre a função das palavras (signos atualizados em contextos frasais) como signos evocadores de imagens, impregnando-as de conceitos (emergentes da cultura em que se inserem) por meio dos quais o redator tenta estimular a imaginação do leitor. Isso ressalta, também, sobre a mente interpretadora capaz de produzir imagens – sob o estímulo do texto –, cada vez mais, diante de signos icônicos ou indiciais, considerando que a semiose é um processo de produção de significados.

Apoiando-se em Simões (2009a), que aponta a iconicidade como base do construto teórico, aplicando a Teoria da Iconicidade Verbal (TIV) para analisar a eficiência do diálogo entre processos cognitivos e a estrutura textual, neste projeto pretendemos analisar o processo de construção de significados do conceito de elétron, por um grupo de alunos de um curso de Licenciatura em Química, a partir da abordagem da mecânica quântica, com base na dinâmica da semiose. Acreditamos que a limitação de utilização de livros didáticos em sala de aula, ante à perspectiva do uso de representações na área em estudo, possa ser uma ponte para a reflexão da utilização de outras ferramentas. À vista disso, põe-se em cogitação as implicações contidas na utilização de romances de ficção para a aprendizagem de conceitos científicos.

Em termos didáticos, e a fim de dar suporte para a exploração do diálogo entre processos cognitivos e a estrutura textual, pode-se pensar textos de ficção como uma narrativa que carrega potencialidades a serem trabalhadas sob o despertar de um raciocínio crítico. Assim como os livros didáticos são utilizados com base em uma perspectiva de aprendizagem de conteúdos – contendo linguagens matemática, química etc., as escritas de ficção carregam características próprias, que dão subsídio para seu objetivo de uso. Nesse contexto, Piassi e Pietrocola (2009) trazem a concepção de ‘ciência extrapolada’ de Allen (1976) para discutir sobre a produção de um conteúdo vinculado a um texto, descrevendo a ficção científica (um gênero de texto de ficção) como algo que “não é o conteúdo em si, mas uma diretriz para a sua construção” (p. 528). Com isso, textos de ficção possibilitam que, sobre ele, ferramentas sejam manuseadas a fim de construir as ideias dispostas nas camadas que estruturam esse gênero textual.

E no jogo entre o atributo atrativo da ficção científica e a constituição de um conceito, possibilita-se citar Causo (2003 apud PIASSI; PIETROCOLA, 2009) que aborda a presença de um fato extraordinário, como característica da ficção científica, como um aspecto proporcionador de interpenetração entre a consciência do real e do cotidiano, causando um embate à consciência que admite como parte de sua experiência imediata um determinado fato com esse algo novo que vem desafiar tal experiência. Perante o exposto, pode-se pensar sobre o âmbito fértil das obras de ficção diante do ensino e aprendizagem de conceitos da ciência Química, que carrega a necessidade do desenvolvimento da imaginação diante do uso de representações.

Neste projeto, elegemos a obra de ficção *Alice no País do Quantum*, escrita por Robert Gilmore (1998), para possibilidade de abordagem de conteúdos químicos, mais especificamente o conceito de elétron. Consideramos que esta obra se dá entre dois gêneros de ficção: a fantasia e a fábula¹. Como características desses dois tipos de ficção, têm-se a presença de elementos que fazem um convite à suspensão da realidade – proporcionando a formação de imagens mentais com particularidades estranhas à mente do leitor –, e uma narrativa que apresenta aspectos extraordinários por meio de uma verdade cotidiana, respectivamente. Os integrantes dos referidos gêneros textuais oportunizam pensar sobre as interpretações construídas pelos indivíduos ao interagirem com tais tipos de materiais.

Nessa perspectiva, é interessante trazermos o que pontua Tavares (1992 apud FERREIRA, 2016) sobre a funcionalidade no discurso ficcional e no discurso científico. Ao primeiro, atribui-se, para alguns gêneros de ficção, um constante confronto entre o que se tem como experiência cotidiana e aquilo que habita o universo do improvável, enquanto ao segundo, compreende-se um movimento daquilo que é conhecido para aquilo que não faz parte da experiência real. Com isso, podemos refletir sobre como o diálogo entre esses dois discursos pode potencializar o que cada um oferece.

Isto posto, é relevante pontuar o desenvolvimento da obra literária citada acima, que acontece sobre uma explanação das teorias clássicas da física, estabelecendo ligações com a mecânica quântica. Como parte dos componentes da narrativa, têm-se a personagem Alice, que, em uma tarde entediante, ao cair dentro de uma televisão, acaba indo parar no país do *quantum*. Neste momento, Alice passa a fazer parte de cenários que põem o(a) leitor(a) a interagir com notas explicativas, cujas direcionam à relevância da mecânica quântica presente nos tópicos quânticos que Alice encontra durante o enredo, e com uma série de analogias.

¹ <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/literatura/genero-literario>> acessado em 29 de jun. de 2020.

Estas, por sua vez, como aponta Gilmore (1998), “não podem nunca ser uma representação verdadeira da realidade, na medida em que os processos quânticos são de fato bastante diferentes de nossa experiência ordinária” (p. 7). As notas dispostas ao longo do texto da obra podem ser consideradas como ferramentas para ensinar quântica, uma vez que elas assumem bem a função de explicar o real significado das peripécias da personagem Alice. Dessa maneira, a leitura da obra acaba proporcionando reflexões sobre as percepções do comportamento do mundo real diante da explicação do comportamento de microssistemas.

Com isso, propomos o seguinte problema de pesquisa: Qual o papel da iconicidade presente no livro *Alice no País do Quantum* durante a construção de significados sobre o conceito de elétron, na perspectiva da mecânica quântica, por estudantes de um curso de licenciatura em Química? Acreditamos que a possibilidade da interação com textos de ficção, pautados em trabalhar conceitos científicos sob uma ótica da fantasia e da fábula, pode proporcionar aos alunos a criação de imagens icônicas, através de metáforas, levando a uma mediação do processo de aprendizagem.

O estudo será organizado a partir de uma oficina, contando com momentos síncronos e assíncrono, cujos irão proporcionar a participação dos inscitos na oficina, a fim de gerar os dados a serem construídos e posteriormente analisados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o processo de construção de significados do conceito de elétron, por um grupo de alunos de um curso de Licenciatura em Química, a partir da abordagem da mecânica quântica na obra Alice no País do Quantum.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar como os estudantes manipulam os diferentes tipos de signos icônicos, considerando a Teoria da Iconicidade Verbal, através de marcadores presentes em seus discursos para a construção de significados sobre o conceito de elétron ao longo de uma intervenção didática;
- Identificar os níveis de iconicidade presentes no livro Alice no País do Quantum de acordo com a Teoria da Iconicidade Verbal.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, apresentamos uma discussão acerca da base teórica que fundamenta o presente projeto. Assim, tentamos estabelecer um diálogo a partir de reflexões sobre a mecânica quântica, focando também no conceito de elétron, processos cognitivos relativos à aprendizagem e a teoria da iconicidade verbal.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA QUÂNTICA E O CONCEITO DE ELÉTRON

A evolução dos estudos sobre a Mecânica Quântica (MQ) propôs a introdução de uma visão de ciência que carregava ideias divergentes dos conceitos já existentes na visão de ciência embasada na Física Clássica (FC). As divergências entre uma ótica que agora parecia conter inconsistências, e outra que apresentava novas questões ao conhecimento científico, significaram uma ruptura na maneira em como se compreendia o mundo. A ascensão dessa nova compreensão de mundo – conhecimento acerca da realidade – se deu a partir de debates envolvendo questões científicas e epistemológicas no início do século XX (RODRIGO SIQUEIRA-BATISTA; ROMULO SIQUEIRA-BATISTA; HELAYEL-NETO, 2003).

Um dos aspectos interessantes a serem refletidos sobre a necessidade do desenvolvimento de uma nova teoria, para a compreensão da constituição da matéria, teve importantes investigações geradas a partir de problematizações em torno da estrutura eletrônica dos átomos. Considerando a quantidade de modelos atômicos que foram desenvolvidos ao longo da história, podemos pensar que cada um deles, suscetivelmente, puderam refinar cada vez mais a compreensão da estrutura microscópica dos átomos. Em termo das inconsistências do conhecimento científico à base das concepções da física clássica, Rodrigo Siqueira-Batista, Romulo Siqueira-Batista e Helayel-Neto (2003) dialogam sobre a distribuição dos elétrons no interior do átomo, pelo modelo de Rutherford, destacando que, em 1904, um cientista chamado H. Nagaoka “propunha que o átomo deveria ser constituído por elétrons girando em círculos ao redor do núcleo central” (p. 33). Os autores declaram, ainda, que as ideias da teoria eletromagnética clássica, usadas para compreender tal comportamento no átomo, apontava uma instabilidade da matéria, pois a trajetória descrita para os elétrons proporcionaria a perda de energia e o deslocamento em uma espiral, fazendo com que os elétrons colidissem com o núcleo. Dessa forma, a história da ciência, mais tarde, mostraria que esses modelos deveriam cair em desuso.

Havia muitas questões que estavam sendo discutidas e que separavam a física clássica da mecânica quântica, mas, podemos destacar que a primeira tinha um olhar de precisão sobre o conhecimento obtido através dos estudos da época, enquanto a segunda, como declara Mokross (1997, p. 137), não se preocupava “em estabelecer de forma objetiva um paradigma para a constituição da matéria”. A maneira como essas duas concepções do conhecimento científico olhava para os fenômenos estudados também destaca os atributos descritivos que cada uma carregava. A FC, que muito se apoiava no eletromagnetismo clássico, observava as partículas contendo trajetórias precisas, como já falamos brevemente, no entanto, a MQ não poderia carregar esses aspectos descritivos. Pelo contrário, ela deveria afastar-se dos termos que tratassem das partículas com trajetórias definidas, mas que agora fossem vistas sob uma ótica de função de probabilidade, como bem discute Heisenberg (1995, apud LEITE; SIMON, 2010). Essa visão probabilística tinha uma relação de dependência, como afirma Rodrigo Siqueira-Batista, Romulo Siqueira-Batista e Helayel-Neto (2003) com grandezas físicas, como a energia e o momento da rotação em torno do núcleo.

Tal conhecimento só foi possível a partir de estudos empíricos, os quais descrevemos alguns em mais detalhes no tópico a seguir.

3.1.1 Contribuições experimentais no desenvolvimento da Mecânica Quântica

Considerando as incongruências que as leis da física clássica passaram a ter diante da explicação da estrutura atômica, uma série de estudos começaram a ser realizados, em busca de novas explicações para o que, agora, a FC não podia mais explicar. Dentre esses estudos, houve a realização de experimentos que contribuíram para a construção de alguns conceitos importantes no desenvolvimento da teoria quântica, além das concordâncias e discordâncias entre cientistas, as quais também foram substancialmente importantes para o desenvolvimento da MQ. Em relação às contribuições experimentais que proporcionaram uma mudança no conhecimento científico no início do século XX, começaremos discutindo sobre a investigação das propriedades da luz.

Autores apontam que, no início da década de 1920, havia um conflito entre o modelo ondulatório e corpuscular da luz (MAHAN; MYERS, 1995), e outros autores discutem sobre a radiação eletromagnética em termos de caracterizá-la como um campo elétrico e outro magnético que oscilam entre si, definindo, matematicamente, como o produto entre uma frequência, descrita pela letra grega ν (ni), e um comprimento de onda, descrito pela letra grega λ (lambda), que resulta na velocidade da luz (c) (eq. 1), quando se considera uma

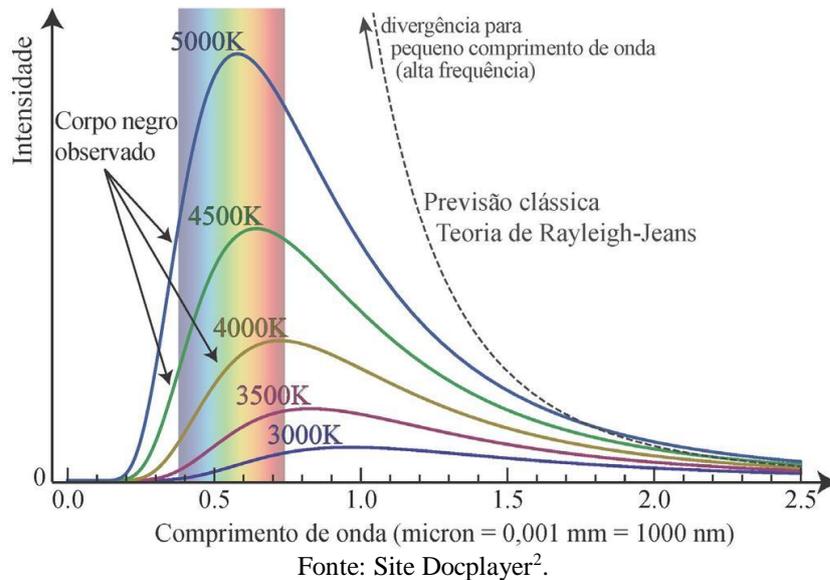
propagação através do espaço vazio (vácuo) (ATKINS; PAULA, 2012). É importante considerarmos que, como já falamos brevemente, houve a necessidade de novos estudos, e a realização de experimentos envolvendo a radiação eletromagnética foram muito valiosos para a compreensão do comportamento da matéria.

$$\lambda\nu = c \quad (\text{eq. 1})$$

Em termos das inconsistências da teoria eletromagnética, consideramos a proposta de uma discussão sobre a inadequação dessa teoria para explicar a radiação emitida por um corpo sólido aquecido (MAHAN; MYERS, 1995). Para refletirmos acerca disso, vamos pensar a respeito de um determinado modelo de experimento caracterizado por radiação de corpo negro. Tal modelo experimental idealizava “um corpo capaz de emitir e de absorver uniformemente todas as frequências da radiação”, e que a lei de Rayleigh-Jeans dava subsídio a isso no quesito de compreender a matéria como formada por osciladores, cujos oscilavam conforme a correspondente frequência que os excitava (ATKINS; PAULA, 2012, p. 212). No entanto, o que não pode deixar de ser considerado aqui é o fato de que essas ideias continham limitações conforme observou-se os resultados de experimentos realizados, o que gerou a necessidade de novas discussões no meio científico, e a introdução de outras formas de pensar que pudessem explicar as discrepâncias entre o que se idealizava e o que ocorria experimentalmente (ALMEIDA; SANTOS, 2001).

A respeito disso, podemos observar, na Figura 1, como havia discordância entre os resultados experimentais e o que discutia a lei de Rayleigh-Jeans. A curva tracejada apresenta a frequência da radiação emanada pelo sólido segundo Rayleigh e Jeans, e podemos perceber como ela difere das curvas nas temperaturas de 3000 a 5000 K. A esse fato, podemos atrelar que a lei em questão não servia para experimentos considerando pequenos comprimentos de onda (ATKINS; PAULA, 2012), o que implica pensar que se objetos com essa característica fossem aquecidos, a emissão da frequência média da luz não seria coerente com o que dizia a referida lei (MAHAN; MYERS, 1995). Logo, certamente, os cientistas Rayleigh e Jeans desconsideraram algum aspecto que seria essencial para compreender a distinção entre o comportamento da radiação emitida para grandes e pequenos comprimentos de onda.

Figura 1 – Espectro visível da radiação do corpo negro



Percebendo a vulnerabilidade das ideias em questão, foi o cientista Max Planck que constatou a necessidade da inserção de um ponto de vista de que, a radiação, ao invés de estar sendo emitida continuamente, deveria ser absorvida e emitida em determinadas porções (ou pacotes), as quais chamou de *quantum* (RODRIGO SIQUEIRA-BATISTA; ROMULO SIQUEIRA-BATISTA; HELAYEL-NETO, 2003). A hipótese do cientista proporcionou que os resultados experimentais pudessem coincidir com as curvas experimentais para a radiação do corpo negro, como podemos observar na Figura 1. A grande revolução desse cientista estava na ideia de que apenas alguns valores definidos de energia seriam permitidos, de acordo com o material utilizado, e essa energia estaria associada a um grupo de átomos (osciladores na matéria). Assim, a contribuição de Planck para o desenvolvimento da física quântica é conhecida por uma expressão que relaciona a energia (E) ao produto entre um número inteiro positivo, representado pela letra n , a constante de Planck, representada pela letra h e a frequência do oscilador, representada pela letra grega ν ($n\nu$) (eq. 2) (MAHAN; MYERS, 1995).

$$E = nh\nu \quad (\text{eq. 2})$$

Max Planck foi o primeiro cientista a apresentar ideias que envolviam questões muito distintas das quais a comunidade científica estava acostumada a abordar, uma vez que se tratava de “conceitos que contrariavam totalmente as leis clássicas da física” (MAHAN; MYERS, 1995, p. 272).

² <<http://docplayer.com.br/75082070-Radiacao-eletrmagnetica-i.html>> acessado em 13 de fev. de 2021.

Em 1819, os cientistas Pierre-Louis Dulong e Alexis-Thérèse Petit, ao realizar medidas experimentais de capacidades caloríficas de treze substâncias, puderam concluir que havia uma lei física que poderia ser destinada para todas as substâncias elementares (BRAGA, 2001). Tais substâncias foram descritas como sólidos atômicos, e nos faz refletir a respeito de que essa generalização estava associada às capacidades caloríficas molares dessas substâncias serem iguais (ATKINS; PAULA, 2012). No entanto, sabemos que o desenvolvimento científico se dá por meio do surgimento de novas técnicas de pesquisa, e por pessoas que se interessam em investigar novas questões em torno de um fenômeno. Com isso, observou-se a ocorrência de desvios na lei estabelecida por Dulong e Petit, uma vez que o surgimento de técnicas de refrigeração possibilitou perceber que as capacidades caloríficas tendiam a zero quanto mais a temperatura tendia a zero (ATKINS; PAULA, 2012). Portanto, não é difícil pensar que, mais uma vez, o contexto necessitava de um olhar mais perspicaz e crítico diante do que se vinha estudando, dado que havia lacunas no conhecimento que estava sendo desenvolvido. É importante pensarmos que essas lacunas foram de extrema importância para que outros cientistas pudessem dar suas contribuições, e dar espaço para novas discussões.

Entretanto, faz-se pertinente levarmos em consideração que a hipótese de Planck, inicialmente, teve sobre ela olhares duvidosos, inclusive do próprio cientista (MAHAN; MYERS, 1995). Porém, mesmo que após Planck anunciar sua proposta tenha ocorrido outras investigações que não destinaram a devida atenção para ela, devemos pensar que o desenvolvimento científico não acontece de maneira linear, ou seja, a ocorrência do retorno a alguns aspectos discutidos anteriormente podem ser necessários para que o progresso ocorra. E é com base nisso que podemos colocar em discussão como o cientista Albert Einstein utilizou da proposta de Planck para explicar um dos fenômenos mais importantes para a mecânica quântica: o efeito fotoelétrico (MAHAN; MYERS, 1995). Mas, antes de chegarmos a esse ponto, devemos considerar outras particularidades pertinentes até esse marco no campo do desenvolvimento científico.

Para explicar o comportamento de desvio apresentado nos resultados experimentais que tentaram ser descritos pela lei de Dulong e Petit, Einstein também fez uso da hipótese quântica de Max Planck, quando constatou que os osciladores na matéria oscilavam com uma energia definida por valores de $nh\nu$ (ATKINS; PAULA, 2012). Dessa forma, Einstein conseguiu apresentar uma explicação para as discrepâncias que se observava entre altas e baixas temperaturas, o que pode nos levar a pensar que isso proporcionou um destaque ao olhar de quantização da energia que havia sido proposto por Planck. Como já comentamos brevemente, essa quantização foi utilizada por Einstein, mais tarde, para explicar um outro

fenômeno que já estava a ser investigado, mas que não via a quantização da energia como pertinente para a compreensão dos efeitos que se apresentavam (MAHAN; MYERS, 1995).

Para refletirmos a respeito do que propôs o efeito fotoelétrico de Einstein, é importante considerarmos que, no final do século XIX, dois cientistas, Heinrich Hertz e Lenard, realizaram experimentos com descarga elétrica e tentaram explicar a emissão de elétrons de uma superfície sob uma ótica da teoria ondulatória clássica da radiação (ALMEIDA; SANTOS, 2001), no entanto, “ao considerar que a energia dos elétrons devia aumentar com o aumento da intensidade da luz incidente” (MAHAN; MYERS, 1995, p. 272), não levou-se em conta a hipótese da apresentação de um desacordo nos resultados experimentais. Albert Einstein, que já havia considerado a hipótese quântica de Planck como possibilidade para interpretar a problemática envolvendo as capacidades caloríficas, teve sua atenção atraída para essa nova incompatibilidade no meio científico, e pôs-se a investigar em torno das ocorrências da interação entre matéria e energia (RODRIGO SIQUEIRA-BATISTA; ROMULO SIQUEIRA-BATISTA; HELAYEL-NETO, 2003). O cientista, percebendo a necessidade da introdução de uma quantização da energia radiante (ALMEIDA; SANTOS, 2001), chegou à conclusão de que essa perspectiva implicava que a luz fosse constituída de partículas discretas – os fótons (MAHAN; MYERS, 1995).

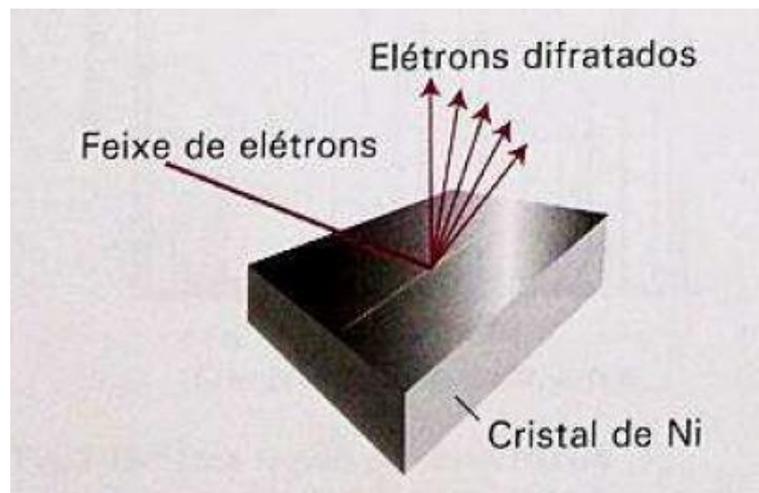
Assim, podemos considerar que, para a compreensão do efeito fotoelétrico, deve-se tomar nota de que, independentemente do aumento da frequência da luz, pode haver a emissão de elétrons, desde que a frequência incidente supere as forças atrativas entre o elétron e o metal, e que, em caso de um excesso de energia, este deve se apresentar em forma de energia cinética do elétron ejetado (MAHAN; MYERS, 1995). O que podemos perceber é que, mais uma vez, na linha do tempo do desenvolvimento científico, a introdução de uma ideia, que ia na contramão do que a maioria propunha como explicação, pode ser considerada como um ponto de luz capaz de atrair a atenção de outros estudiosos que, mais à frente, iriam conseguir utilizar de tais ideias para formar a base de outros conhecimentos.

Uma experiência realizada pelos físicos Clinton Davisson e Lester Germer, descreveu que a ocorrência de uma “elevação ocasional de uma temperatura provocou a cristalização de uma amostra policristalina que eles estavam examinando” (ATKINS; PAULA, 2012, p. 219). O comportamento de rede de difração apresentado na experiência dos referidos cientistas mostrou a ideia de que as partículas tinham propriedades ondulatórias. Na Figura 2, podemos observar alguns elementos dessa experiência. A difração dos elétrons foi uma ocorrência que pôs em pauta a questão de a matéria ter também um caráter ondulatório, uma vez que se

percebia uma interferência entre os elétrons que eram espalhados pelo cristal (ATKINS; PAULA, 2012).

Com isso, podemos estabelecer relações com o que já havia sido considerado por Einstein, ao discutir o efeito fotoelétrico, que colocou em pauta uma teoria corpuscular da luz (MAHAN; MYERS, 1995). Conseguimos perceber que estes marcos científicos tocaram no cerne da física clássica, uma vez que causaram conflitos intelectuais em termos da matéria e da radiação apresentarem um caráter dual, comportando-se como partícula e onda. Mais adiante, discutiremos de maneira mais detalhada como a fragilidade de conceitos da física clássica, aplicados a um universo microscópico, implicou na necessidade do desenvolvimento de uma nova mecânica que considerasse como um dos seus pilares a dualidade onda-partícula (ATKINS; PAULA, 2012).

Figura 2 – A experiência de Davisson-Germer



Fonte: Atkins e Paula (2012, p. 218).

Em Almeida e Santos (2001), podemos perceber que o cientista Louis De Broglie, em 1924, também propôs que a matéria tinha associada a ela um comportamento de dualidade onda-partícula, e destacou que uma partícula como o elétron teria “associada a ela uma onda de matéria que governa seu movimento” (p. 8). Mesmo que não estivessem trabalhando juntos, havia cientistas que destinavam seus olhares para um mesmo horizonte: a indispensabilidade do desenvolvimento de uma nova visão científica. E essas concordâncias de perspectiva desses cientistas foram cruciais para o que entendemos hoje por mecânica quântica.

A aurora da forma de uma nova visão científica também é iluminada pela realização de um experimento que trouxe importantes questões acerca da dualidade da matéria

Almeida (2005) nos traz uma discussão em torno de um experimento que ele declara abordar bem a problemática da dualidade da matéria – a experiência das fendas de Young. O autor discursa que o médico e físico britânico, Thomas Young, realizou seu experimento incidindo uma fonte luminosa em uma placa perfurada com duas fendas, cuja luz atravessava e atingia uma placa fotográfica, apresentando, nessa superfície, um comportamento como a propagação de ondas na água. A isso, o autor apresenta um questionamento: “Como as partículas podem criar essas interferências que se acreditava serem próprias das ondas?” (p. 147). Aqui, faz-se pertinente pensarmos sobre como os conceitos de onda e partícula, agora, já não podiam mais serem analisados isoladamente, como costumava ser ferramenta da física clássica. Um experimento como o das fendas de Young nos apresenta a relevância de haver olhares que vão além do que se vê.

A ideia da existência de uma natureza dual, relativa à luz, acabou sendo aplicada à outras partículas do mundo quântico, sendo uma ideia adotada para se compreender a natureza da partícula elétron, por exemplo. Assumir que o elétron apresenta uma dualidade, com comportamento onda-partícula, implica em uma visão epistemológica diferente para a Mecânica Quântica, como discutiremos a seguir.

3.1.2 Base filosófica para a Mecânica Quântica

Bastos Filho (2003) destaca dois períodos correspondentes ao desenvolvimento das ideias quânticas: o primeiro (1900-1924) se caracterizou pela velha teoria quântica, a qual possuía uma perspectiva filosófica bastante distinta do período sucessivo, uma vez que os conceitos utilizados para os estudos científicos e divulgação dos mesmos atribuía-lhes uma maneira de pensar que se diferenciava da teoria quântica referente ao período sucessivo (1924-1927). Em termos dessa trajetória, Piza (2005) dialoga sobre a maturação da velha teoria quântica ter carregado elementos da física tradicional, e que pode ser pensada a partir da proposta ousada do cientista Planck, enquanto a mecânica quântica, como hoje é entendida, emergiu de trabalhos de cientistas como Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger, que também percorreram um trajeto intelectual. Diante disso, é importante refletirmos sobre o caminho traçado pelos cientistas que contribuiram para o desenvolvimento desses dois períodos, pois eles eram indivíduos inseridos em uma realidade que poderia constituir total influência no curso de seus pensamentos científicos.

Em Bastos Filho (2003), podemos perceber que o autor nos apresenta uma discussão entorno de que houve muitas correntes filosóficas que puderam influenciar o curso do

desenvolvimento dos dois períodos citados acima, no entanto, o autor opta por dar um maior destaque à corrente positivista. À esta corrente somos guiados para pensar sobre ela como uma corrente que destina seus interesses aos dados imediatos da experiência, não se preocupando com as causas. Bastos Filho (1999 apud BASTOS FILHO, 2003) destaca como sendo uma das adoções filosóficas, características das correntes positivistas, o inflexível distanciamento entre sujeito e objeto, e isso pode nos levar a refletir como essa característica pode se comportar diante do que se compreende por ciência.

Na comunicação entre o que a natureza nos apresenta, e a interpretação que damos a ela, de acordo com o desenvolvimento de nosso intelecto, podemos retratar acerca do que Leite e Simon (2010) dialogam sobre a interpretação que o cientista Heisenberg conferiu às duas correntes filosóficas, o materialismo e o idealismo, que possuíam características antagônicas e haviam surgido a partir da busca dos gregos por uma compreensão dos fenômenos que estes observavam acontecer na natureza. Os autores declaram que o cientista Heisenberg observava na descoberta do cientista Planck (a quantização da matéria) aspectos para além de resolver um problema da termodinâmica, mas também em visitar correntes de pensamentos filosóficos que há muito já haviam colocado em debate a composição da matéria.

Os questionamentos que habitavam a mente dos gregos foram muito importantes para a formulação de perguntas que impulsionaram o pensamento científico. O filósofo Demócrito pensava que “os constituintes últimos da matéria eram inalteráveis e indestrutíveis partículas materiais”, enquanto o filósofo Platão levava em conta “que as menores partículas de matéria são, por assim dizer, apenas formas geométricas” (LEITE; SIMON, 2010, p. 226). A disputa entre ideias que se afasta uma da outra não é um evento exclusivo da Antiguidade, como bem sabemos. Até que uma ideia seja substituída por outra, é preciso que se encontre elementos que apontem a necessidade do aprofundamento de questões entorno de determinados fenômenos.

Se o materialismo e o idealismo tinham entre si reflexos de desencontro, podemos fazer um paralelo com as questões pertinentes à mecânica quântica. Sendo assim, se essa nova visão científica também colocava em pauta ideias que eram antagônicas, haveria de abraçar uma única corrente, para possibilitar o seu progresso? Vamos refletir acerca da relação entre o macronível – o que a nossa experiência pode alcançar –, e o micronível. O primeiro, esta extensão a qual podemos usar um discurso comum à nossa realidade, para descrever fenômenos, entra em conflito com o segundo, que se trata desse universo ao qual necessitamos de outros discursos para descrever e representar seus fenômenos. Ligado a isso,

podemos refletir sobre como o desenvolvimento da mecânica quântica colocou em pauta, constantemente, uma ligação entre esses dois níveis, ao trazer o que Heisenberg (1995 apud LEITE; SIMON, 2010) comentou quanto à nova realidade com que se deparou, descrevendo como “um tipo estranho de realidade física a mediar entre possibilidade e realidade” (p. 238).

Diante das estruturas de pensamento que a filosofia ofereceu como contribuição para a construção da teoria quântica, e que foram fonte de conflitos cognitivos entre os indivíduos que faziam parte de tal contexto, podemos pensar a respeito das complexas relações entre o sujeito e o objeto, que desencadearam uma necessidade de se caracterizar uma realidade objetiva, como bem é discutido por Bastos Filho (2003). Isso nos guia até o jogo entre descrição e interpretação da natureza, raciocinando sobre uma ontologia do mundo físico que dialoga com uma compreensão epistemológica. Conhecer a natureza é uma tarefa que exige de nós um espírito crítico e de pluralismos, considerando o que nos diz Heráclito (fragmento 123 apud SILVA, 2010, p. 34): “a natureza ama esconder-se”.

A nível da compreensão da matéria, os chamados filósofos da natureza foram muito importantes ao lançar dúvidas sobre questões que se tornaram fundamentais para o conhecimento científico.

Achamos importante destacar que existem inúmeras outras controversas filosóficas envolvendo a mecânica quântica – apenas fizemos um passeio pela superfície dessa esfera. Nesse campo, encontra-se as possibilidades de explorarmos, a fim de tornar mais inteligíveis essas interrogações do saber, como a realidade e a observação estruturam conflitos necessários para um aprofundamento das interpretações entorno dessa ciência.

3.1.3 O conceito de elétron

Tales de Mileto (640-550 a.C.), um dos pensadores da Antiguidade, dedicou-se a algumas observações que podem ser consideradas elementares no estudo de fenômenos elétricos e magnéticos. Ao atritar o âmbar – resina fossilizada de pinheiros pré-históricos, e que pode ser compreendido como *eléktron*, em grego – com uma pele de animal, notou que ele havia adquirido o poder de atrair objetos pequenos, como grãos de areia que estivessem por perto³. Podemos refletir como tal concepção filosófica foi muito necessária para posteriores momentos no desenvolvimento do pensamento científico. Não vamos explorar outros estudos realizados após a contribuição desse filósofo, mas, caminharemos para a

³ <<https://www.ufrgs.br/eletromagnetismo/material-suplementar/historia-do-eletromagnetismo/>> acessado em 16 de fev. de 2021.

discussão do desenvolvimento da ciência em um contexto que consideramos de destaque para a realização de algumas discussões no presente trabalho.

Vamos considerar o desenvolvimento da ciência em Manchester, local onde deu-se o pontapé para importantes acontecimentos entorno da evolução do conhecimento da ciência física e química. Entre os séculos XIX e XX, como cita Navarro (2012), a instituição Sociedade Literária e Filosófica de Manchester (*Manchester Literary and Philosophical Society – the Lit & Phil*) era a única em que se fazia presente a filosofia natural e era restrita a um certo número de membros. Neste cenário, o autor cita o mais conhecido filósofo natural autodidata da época, John Dalton, que se tornou membro da Sociedade em 1794, presidindo-a desde 1817 até 1844 (ano de sua morte), e foi enquanto participava desse ambiente que ele desenvolveu sua teoria atômica da matéria.

O estabelecimento dos princípios básicos da teoria atômica de Dalton se deu a partir de uma apresentação do cientista à Sociedade Literária e Filosófica, em que se tratava de uma memória intitulada *Absorption of gases by water and other liquids* (Absorção de gases pela água e outros líquidos). Sobre a teoria atômica do cientista, é importante considerar os princípios que declaram que

1. Os átomos são partículas reais, descontínuas e indivisíveis da matéria, e permanecem inalterados nas reações químicas; 2. Os átomos de um mesmo elemento são iguais e de peso invariável; 3. Os átomos de elementos diferentes são diferentes entre si; 4. Na formação dos compostos, os átomos entram em proporções numéricas fixas 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 2:5 etc; 5. O peso do composto é igual à soma dos pesos dos átomos dos elementos que o constituem.⁴

Podemos pensar que o momento e ambiente destacados eram sinônimo de um campo intelectualmente fértil, em que havia muitas discussões a respeito das áreas em vigor. Um cientista chamado James Prescott Joule foi responsável por desenvolver ideias e experimentos que deram subsídio para o que foi o seu marco no desenvolvimento científico: a conservação e transformação de diferentes formas de energia. As contribuições deste cientista, juntamente com as de Dalton, foram um plano fértil para a ótica científica de um outro cientista, chamado Joseph John Thomson, cujo refletiu e realizou pesquisas sobre o que ele chamava de Ciências Físicas, um conceito que incluía os ramos da física e algumas áreas da química (NAVARRO, 2012). Podemos pensar que a ótica extensiva de Thomson foi um pontapé para a grande chave das contribuições do cientista na compreensão de um dos componentes do átomo: o elétron.

⁴ <<http://allchemistry.iq.usp.br/metabolizando/beta/01/jdalton.htm>> acessado em 22 de jun. de 2021.

Refletindo sobre as contribuições científicas de um cientista a outro, não podemos deixar de fora importantes discussões feitas por Navarro (2012) a respeito de influências que o cientista Thomson teve, e de como elas foram cruciais para o desenvolvimento da chamada teoria eletromagnética da matéria. Os fenômenos eletromagnéticos, que faziam parte dos interesses do cientista Maxwell, e as experiências sobre os raios catódicos feitas por William Crookes e Eugen Goldstein (DARRIGOL, 2000 apud NAVARRO, 2012) guiaram Thomson ao caminho de observar a descarga elétrica em gases, e ao encontro das considerações elétricas dos tubos de Faraday. Uma vez que a ciência é movida pela curiosidade de indivíduos que se preocupam com os mistérios do que escapa de nossa experiência imediata, o exercício de indagações com potencial de aperfeiçoamento pode ser considerado como a alavanca do desenvolvimento científico.

Além disso, como os indivíduos se percebem nesse âmbito, e realizam seus movimentos, precisa considerar, também, a época em que estão vivendo. Não obstante, é importante o que nos apresenta Navarro (2012) ao dialogar sobre J. J. Thomson ter sido um defensor da longa tradição vitoriana. A Era Vitoriana (1837-1901) foi um período rico e complexo que possibilitou a estruturação do mundo como conhecemos hoje, com grandes marcos de colonização e industrialização⁵. Mais adiante, iremos discutir sobre como esses aspectos iniciais das investigações de Thomson foram importantes para que ele pudesse apresentar à comunidade científica questões que envolviam uma partícula a qual segurava inúmeros questionamentos entorno de sua existência.

Assim como Thomson, um outro cientista chamado Arthur Holly Compton também trabalhou com o espalhamento da radiação pela matéria, mais especificadamente com o estudo com raios X e γ . É importante frisar que Compton resistia em aceitar a teoria quântica, fazendo uso de interpretações clássicas para os seus estudos. No entanto, a sua resistência lhe apresentava obstáculos que não eram superados a partir da linha de pensamento que ele estava a utilizar (I. SILVA; FREIRE JÚNIOR; A. SILVA, 2011). Os autores em questão apontam que durante esse período, Compton chegou a ir na contramão do que Thomson compreendia por elétron, uma vez que ele relacionava o elétron com o comprimento de onda da radiação incidente (COMPTON, 1919 apud I. SILVA; FREIRE JÚNIOR, A. SILVA, 2011).

Vale salientar que há uma cautela em atribuir a descoberta do elétron a Thomson, pois, como aponta Silva, Santos e Dias (2011), embora tenha sido ele a considerar a hipótese do elétron como constituinte da matéria, suas medidas experimentais não estavam totalmente em

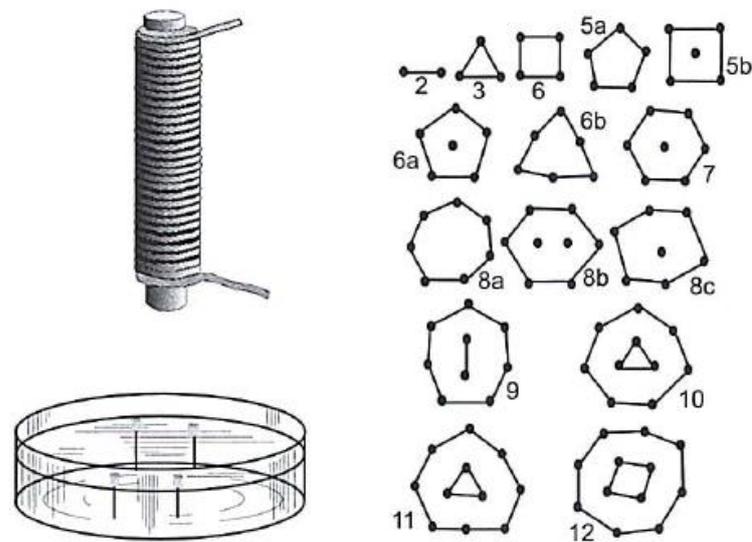
⁵ <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/historia-geral/era-vitoriana>> acessado em 21 de set. de 2020.

consonância com a sua proposta. Os autores frisam sobre o uso do termo elétron, que já havia sido proposto muito antes das especulações de Thomson, por George Stoney: “para a unidade de eletricidade ganha ou perdida quando os átomos se tornam íons eletricamente carregados” (p. 4).

Ao longo da trajetória do cientista Thomson, podemos perceber que ele fez parte de um dos caminhos mais ricos na História da Ciência. A isso, podemos atrelar a “sua flexibilidade em adotar novos referenciais e produzir novas hipóteses explicativas a partir de suas concepções iniciais” (LOPES, 2009, p. 26). É importante destacar, como já fizemos algumas pontuações, a respeito de como a realidade em que o cientista estava inserido influenciou no curso de seus pensamentos e execução de suas pesquisas. Sabe-se que ele tinha fortes interesses pelo tema da combinação química e da estrutura atômica – inclusive, discutimos acima como as concepções do cientista Dalton foram uma luz para ele –, e esse olhar teve grande influência do seu professor de física Balfour Stewart, que colocou diante de Thomson possibilidades a respeito de uma teoria especulativa da matéria (CHAYUT, 2006).

Por volta de 1897, Thomson anunciou a descoberta do elétron - ele o notava a partir de uma natureza diferente, e acabou não chamando-o de elétron (KRAGH, 1997). Então, podemos começar a adentrar em questões muito importantes até a concepção dessa partícula. Lopes (2009) dialoga a respeito de aspectos interessantes que foram considerados por Thomson para construir explicações para a estrutura atômica, dentre eles estão o átomo vórtex de Kelvin e os ímãs flutuantes de Mayer. O contexto em que os modelos vórtices estavam presentes, considera que o cientista William Thomson (Lorde Kelvin) fez uso destes para adentrar na arquitetura dos átomos como “um conjunto tubos vórtices fechados no Éter – infinito, incompreensível, homogêneo e sem atrito”, buscando também inspiração nos experimentos de Alfred Marshal Mayer com ímãs flutuantes, durante sua elaboração do modelo de átomo, encontrando base em uma “ilustração mecânica do equilíbrio cinético de grupos de colunas vórtices girando em torno de um centro de gravidade comum” (LOPES, 2009, p. 27).

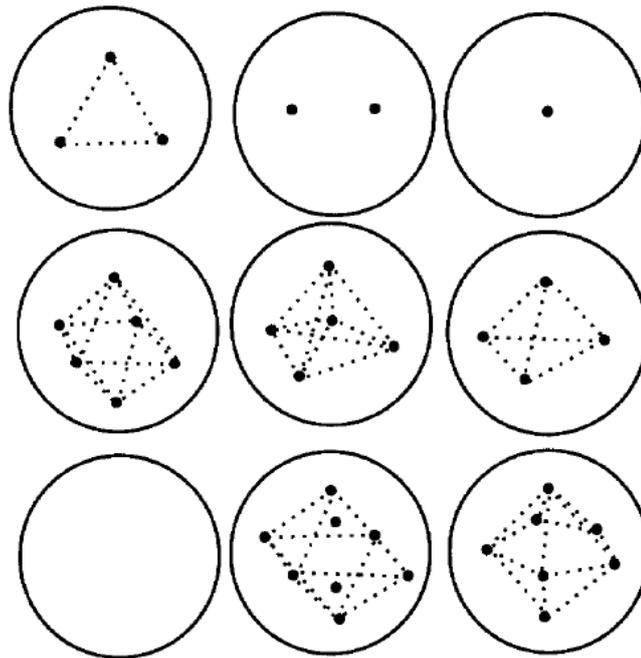
Se Thomson buscou apoio nesses modelos, podemos refletir em como essas inspirações são espelhadas na trajetória do cientista até os estudos para compreender a existência do elétron. Com isso, podemos nos apoiar em Kragh (1997) quando ele declara que esses pequenos ímãs poderiam ser os elétrons, e que a força central que os mantinham girando evitava que o átomo explodisse. A Figura 3 ilustra características do experimento de Mayer.



Fonte: Kragh (1997, p. 329).

É importante destacar o que Lopes (2009) nos apresenta, ao dizer que, embora Thomson tenha se interessado por outras áreas, como as leis da hidrodinâmica e a complexidade matemática na teoria vórtex, houve um período em que ele passou a destinar sua atenção a teorias não-matemáticas e pictóricas. Sabemos que Thomson dedicava-se a realizar estudos no campo da física e da química, como já pontuamos mais acima. Com isso, é pertinente trazer o que Chayut (2006) pontua sobre como as investigações de Thomson possibilitaram uma transformação da teoria química, embora o autor saliente que suas concepções não foram bem recebidas, haja vista que, por volta dos primeiros anos do século XX, a física europeia se destinava a aspectos mais formais e matemáticos, enquanto Thomson guiava sua visão a uma teoria embutida de imagens. Um olhar que ia para além dos horizontes apontados por duas áreas isoladas, pode nos fazer pensar como uma área precisava da outra para que houvesse um aprofundamento dos fenômenos investigados. A Figura 4 ilustra o modelo do átomo de Thomson.

Figura 4 – Átomo de Thomson em três dimensões



Fonte: Kragh (1997, p. 330).

Thomson seguiu para o campo da investigação com os tubos de Força de Faraday, onde pôde observar no átomo o que mais tarde lhe traria um maior campo de visão acerca da estrutura subatômica do átomo. Então, em 1883, o cientista trabalhou com investigações experimentais a partir do uso da condução elétrica por gases, “aplicando a teoria do átomo vórtex à combinação química e o modelo Clausius-Williamson” (LOPES, 2009, p. 28).

O caminho traçado por esse cientista demandou a ele que abandonasse algumas concepções para que pudesse dar lugar a outras que no momento faziam mais sentido. Mas, neste âmbito, é válido refletirmos acerca de como concepções antigas foram tão importantes quanto as mais recentes para que Thomson pudesse compreender o elétron no átomo e desenvolver seu modelo de átomo. Os seus trabalhos com os tubos de descarga foram, sem sombra de dúvidas, um marco muito importante na vida de estudos do cientista. Lopes (2009) discute sobre os pensamentos de Thomson entorno dos *girostats* nos tubos de Faraday, e como o comportamento deles tinha relação com as definições entorno do átomo, destacando como as concepções envolvendo o átomo, a partir dessa realidade, possibilitaram, mais tarde, a determinação da razão entre a carga e a massa das partículas negativas presentes na estrutura dos átomos.

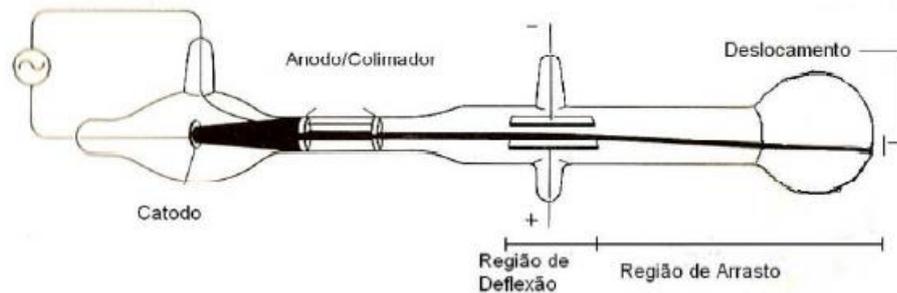
Mas, foi somente no ano de 1904, como declara Lopes (2009), que J. J. Thomson desenvolveu seu modelo de átomo. Até esse ponto, o cientista, buscando levar o pensamento a um primórdio, fazia suas especulações em detrimento de estruturas subatômicas. E, assim

como discutimos mais acima, suas investigações das relações entre matéria e eletricidade tiveram um papel de destaque nesse momento de sua história. A publicação do artigo '*On the structure of atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure*' possibilitou conhecer as concepções de Thomson sobre a constituição dos átomos, cujos se caracterizavam, segundo Thomson (1904 apud LOPES, 2009), por um anel com 'n' corpúsculos negativos se movimentando em uma esfera que carregava um estado eletricamente uniforme.

Considerando os pontos destacados até aqui sobre as contribuições de Thomson para o conhecimento da estrutura da matéria, podemos refletir sobre como não só para a comunidade científica que acompanhava seus estudos, mas também para o próprio cientista, a cada etapa de construção de conhecimento ao qual ele se dedicava, percebia-se que conceber significados sobre a construção dos conceitos se fazia tão pertinente quanto compreender os conceitos. Thomson tinha linhas de raciocínio ao iniciar seus trabalhos experimentais, mas, ele não sabia que a sua pesquisa o levaria à descoberta do elétron, como afirmam Silva, Santos e Dias (2011), como também produziria o primeiro espectrômetro de massa.

Antes que Thomson desenvolvesse seu modelo de átomo, seus experimentos com os tubos de descarga possibilitaram o estudo da razão carga/massa do elétron. Em seu livro *Electricity and Matter*, escrito em 1903 e publicado em 1904, Thomson pôde discutir a respeito do que já citamos como aspecto importante para sua jornada de estudos: a relação entre matéria e eletricidade (LOPES, 2009). Podemos nos apoiar em Silva, Santos e Dias (2011) para destacarmos aspectos importantes entorno dos experimentos com tubos de descarga. Os autores nos apresentam que, sob uma perspectiva da ação de forças elétricas e magnéticas, e as descargas ocorridas, o cientista conseguiu observar desvios dos feixes, consequentes da ionização das moléculas de um gás, dentro do tubo de vidro utilizado, o que lhe impulsionou a realizar a medição do deslocamento produzido pelas forças no raio, e calcular o deslocamento das partículas constituintes do raio. Os autores também destacam que, através de seus cálculos, Thomson descobriu que a atuação de uma força elétrica e magnética em uma partícula era proporcional à carga dessa partícula, e com a obtenção do deslocamento percebia-se as variáveis da partícula na forma carga/massa. O seu trabalho de medição do deslocamento, considerando vários gases e diferentes valores das forças elétricas e magnéticas, foi uma ponte para a compreensão da universalidade das partículas dos raios catódicos: os elétrons. Na Figura 5, podemos observar uma ilustração do equipamento utilizado por Thomson.

Figura 5 – Esquema do equipamento utilizado por Thomson no experimento com raios catódicos



Fonte: Silva, Santos e Dias (2011, p. 3).

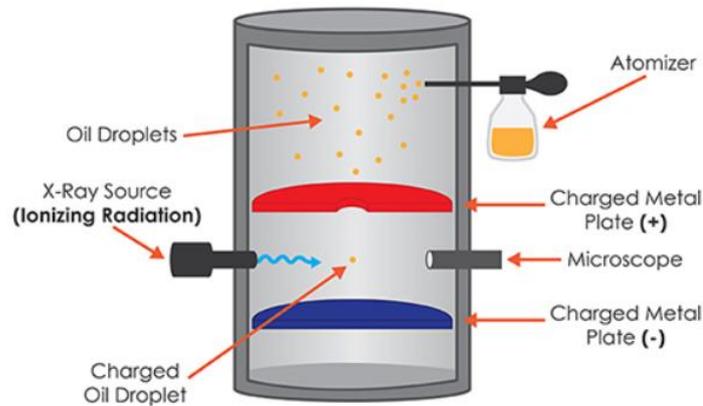
Destacando o que já citamos acima a respeito do perfil de Thomson em trabalhar com teorias pictóricas, podemos considerar o que nos apresenta Chayut (2006), ao retratar sobre como modelos rudes e símbolos pictóricos, atrelados a observações, foram de grande importância para a ciência Química, pois Thomson pôde estabelecer conexões entre os tubos de Faraday e as ligações químicas, ao implementar a estas o que pertencia aos tubos: a dimensão de direção.

A generalidade de uma partícula que Thomson procurava em seus estudos lhe movia para buscar caminhos que fossem para além do que ele observava. Havia inquietações no cientista quando se tratava de estudar o universo atômico, pois ele se preocupava em construir uma trajetória que lhe guiasse a uma compreensão de algo que ele ainda não conhecia, mas que parecia desempenhar um papel muito importante no campo da química. O apoio que o cientista buscou na física teórica foi de suma importância para que ele alcançasse o status que alcançou na química teórica. Por volta de 1923, durante uma conferência, *The Electronic Theory of Valence*, no Departamento de Físico-Química da Universidade de Cambridge, J. J. Thomson declarou que o elétron dominava o campo da química. Essa partícula, agora, parecia crucial no que dizia respeito à composição do átomo (CHAYUT, 2006).

Um famoso experimento, envolvendo gotas de óleo, também foi muito importante para entendermos questões a respeito do elétron. O cientista Robert Andrews Millikan, ao destinar sua atenção para gotas de óleo que desciam por um aparato, percebia que elas adquiriam carga elétrica ao entrar em contato com íons gasosos contidos no espaço. Com uma série de monitorações e observações, e buscando apoio em estudos realizados por Thomson envolvendo a relação carga/massa do elétron, Millikan pôde compreender “que todas as cargas elétricas são múltiplos de uma unidade elementar definida, cujo valor é igual a $1,60 \times 10^{-19}$ C ou $4,80 \times 10^{-10}$ u.e.”, e forneceu suporte para o cálculo da massa do elétron, cuja

corresponde a $9,1 \times 10^{-31}$ kg (MAHAN; MYERS, 1995, p. 268). Na Figura 6, apresentamos um diagrama esquemático do aparato usado por Millikan.

Figura 6 – Aparato usado no experimento de Millikan



Fonte: Science Facts⁶.

Diante da passagem por alguns “blocos” que contribuiram para a construção da velha teoria quântica, não podemos deixar de refletir sobre o modelo atômico de Bohr. French, Kennedy e Feuer (1986 apud GOMES; PIETROCOLA, 2011) pontuam que o modelo “semi-clássico” de Bohr, em 1913, se caracterizou pela introdução *ad hoc* de algumas regras de quantização. O modelo de Bohr era visualizado como um modelo planetário do átomo – considerava que apenas algumas órbitas (circulares e planares) eram concedidas aos elétrons – , e caso o elétron mudasse de uma órbita para outra, haveria a emissão de radiação. Tal modelo foi aperfeiçoado por Arnold Sommerfeld, e era considerado como um modelo sofisticado para a época (GOMES; PIETROCOLA, 2011).

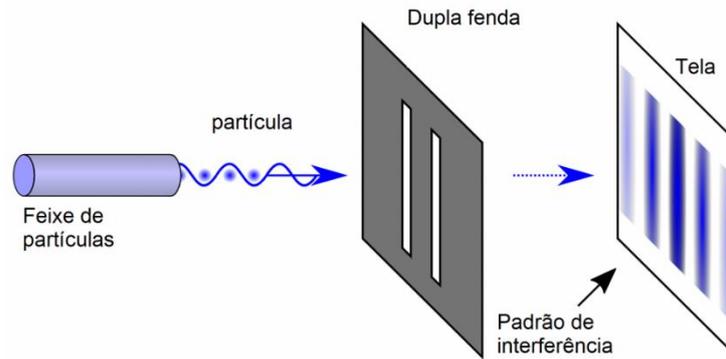
Atentando às pontuações feitas até aqui, podemos pensar que os pontos de vista históricos e experimentais antecedentes à teoria quântica, e no decorrer do desenvolvimento dela, nos guia até a porta de entrada para a dualidade da matéria. Em termos da dualidade do elétron, não podemos deixar de refletir sobre a experiência das duplas fendas de Young, a qual já fizemos alguns comentários anteriormente. Para iniciarmos algumas considerações sobre essa experiência, destacamos aqui o que Mokross (1997) cita sobre como o surgimento de novas técnicas experimentais, após os anos 80, possibilitou uma análise mais individual a respeito de partículas como o elétron.

O experimento das duplas fendas já havia sido realizado com ondas, e sabia-se da ocorrência da formação do padrão de interferência, porém, mais tarde, as análises sobre o experimento das duplas fendas com partículas apresentaram como possibilidade a ideia de que

⁶ <<https://www.sciencefacts.net/oil-drop-experiment.html>> acessado em 20 de dez. de 2021.

“a partícula contém em si uma natureza ondulatória capaz de perceber a existência das duas fendas capacitando-a para gerar a configuração de interferência” (MOKROSS, 1997, p. 140). Esse fenômeno desencadeou a impossibilidade de caracterizar de maneira objetiva aquilo que se espalhava. A Figura 7 ilustra tal aspecto da experiência.

Figura 7 – Ilustração do experimento das duplas fendas com partículas



Fonte: Site Engenharia 360⁷.

Almeida (2005) afirma que em caso de medir por qual orifício passou um elétron, pode perturbar outros, provocando a destruição do fenômeno de interferência: “o que observamos não é mais do que a soma das probabilidades de passagem dos elétrons pelas ambas as fendas” (p. 149). Nesse contexto, pensamos na relação entre um aparelho usado para medir a posição de uma partícula e um observador, que aponta para as nossas limitações diante de fenômenos do mundo microscópico. Assim, é possível observar como experiências realizadas ao longo da História da Ciência puderam ser significativas para uma melhor compreensão da natureza dos elétrons e seu comportamento. Isso implicou na procura de novas possibilidades de explicação para fenômenos que não podiam mais serem explicados com o suporte científico que já se possuía.

Sabemos que um dos pilares da mecânica quântica foi revelar a natureza probabilística dos fenômenos envolvendo elétrons e fótons, por exemplo. O comportamento destes, nos eventos quânticos, harmonizaram ondas e partículas de uma maneira diferente que estas eram tratadas na mecânica clássica. Por isso, é importante refletirmos sobre alguns termos matemáticos, considerando a perspectiva de uma linguagem probabilística. Considera-se o uso de uma função densidade $f(x,t)$, cuja direciona para a possibilidade de detectar um objeto na posição x no instante de tempo t . Na compreensão de um sistema, adota-se uma relação

⁷ <<https://engenharia360.com/fisica-quantica-um-novo-jeito-de-enxergar-as-leis-naturais/>> acessado em 20 de nov. de 2021.

matemática (eq. 3) que indica o estado do sistema. Descritivamente, a fórmula apresenta a densidade de probabilidade como o módulo quadrado de uma função, cuja é denotada pela letra grega Φ (fi) (NOVAES; STUDART, 2016). Ao pensarmos na dinâmica de sistemas microscópicos, não podemos deixar de mencionar a contribuição da função matemática de um cientista chamado Erwin Schrödinger, cujo falaremos a respeito um pouco mais adiante, e que foi fundamental para o cálculo da relação matemática mencionada.

$$f(x, t) = |\varphi(x, t)|^2 \quad (\text{eq. 3})$$

Ainda sobre as relações matemáticas na mecânica quântica, podemos citar a fórmula que relaciona o valor médio de uma medida (eq. 4) sobre todo o espaço, que, através de manipulações matemáticas, entre estas o módulo quadrado e regra de operadores, pode-se encontrar um valor esperado ante as probabilidades de valores encontrados em uma série de medidas correspondentes à observável de interesse (ATKINS; PAULA, 2012, p. 233).

$$\langle \Omega \rangle = \int \varphi^* \hat{\Omega} \varphi dt \quad (\text{eq. 4})$$

Achamos considerável tomar nota de que existem muitas descrições e reflexões a serem feitas sobre o arcabouço de fórmulas matemáticas dessa ciência, mas, não entraremos em detalhes aqui por não fazer parte do nosso foco.

É importante lembrarmos de considerar que o uso que a mecânica quântica faz da densidade de probabilidade não se trata apenas da ignorância de um observador, mas desses aspectos serem próprios de uma teoria que engloba comportamentos de objetos quânticos (NOVAES, STUDART, 2016). Logo, faz-se importante atentar-se aos pilares dessa ciência, uma vez que o conhecimento não deve estar sobre a ação de atar um laço entre o que já é familiar e o que se está a conhecer, mas “que esse vínculo crie uma diferença entre passado e futuro” (PRIGOGINE, 2011, p. 161). Há outras expressões matemáticas a serem consideradas entorno das interpretações quânticas, mas faremos uso apenas destas para pontuar as discussões aqui percorridas.

Uma discussão sobre o que significa uma das ideias mais importantes para a mecânica quântica trata-se do Princípio da Incerteza. A partir de relações matemáticas, encontramos um discurso sobre a pertinência do produto das incertezas de posição e de momento, e que este nunca pode ser menor que um dado valor (eq. 5). Por isso, somos instruídos a considerar que a aproximação da certeza da posição de um objeto quântico implica na incerteza de seu

momento (ou de sua velocidade). A perspectiva inversa também é verdadeira (NOVAES; STUDART, 2016). Podemos imaginar que se tentarmos usar luz para localizar o elétron, a colisão de um fóton com esta partícula pode proporcionar a medição da posição, mas irá refletir em uma incerteza no momento da partícula (MAHAN, MYERS, 1995). Este é o princípio da incerteza de Heisenberg, cujo também se aplica à energia e ao tempo.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\text{eq. 5})$$

Quando pensamos na física clássica e na quântica, sempre nos deparamos com as diferenças que as separam, e que proporcionaram outras explicações para o mundo ao nosso redor. Ainda assim, há aspectos em comum entre essas duas áreas. Com a necessidade de se realizar uma investigação, haverá a interferência de algo externo, no entanto, na física quântica, nenhuma interação pode ser desconsiderada, pois deve-se levar em conta os limites intrínsecos que a teoria quântica carrega. Em um diálogo entre um mundo quântico e um macroscópico, podemos dizer que este carrega um ponto de vista experimental, enquanto aquele engloba um ponto de vista operacional (NOVAES; STUDART, 2016).

Após as discussões feitas aqui, podemos refletir sobre como a formulação da Mecânica Quântica implicava em carregar conceitos que fugia da lógica clássica. Vamos pensar a respeito de como os fundamentos da atual MQ teve destacáveis contribuições de um dos mais importantes cientistas: Erwin Schrödinger. A seguir, apresentamos a equação fundamental da mecânica quântica (eq. 6) (MAHAN; MYERS, 1995).

$$H\Psi_i = E_i\Psi_i \quad (\text{eq. 6})$$

A equação apresenta algumas restrições quando diz que

As energias E_1 , E_2 e E_3 , etc. são obtidas quando o operador Hamiltoniano H é aplicado sobre as funções de onda Ψ_1 , Ψ_2 e Ψ_3 , [...]. O resultado numérico obtido é denominado um auto-valor ou valor-próprio: somente quando H operar sobre uma função de onda adequada Ψ_1 , a resultante será o produto da função inicial Ψ_1 com seu auto-valor E_1 (MAHAN; MYERS, 1995, p. 281).

Heisenberg e Schrödinger destinaram-se a resolver a referida equação – e tinham bases distintas para o fazer –, no entanto, não entraremos em detalhes aqui sobre essas questões. O que nos interessa é raciocinar sobre quais aspectos entorno do pensamento científico de Schrödinger podem contribuir para as nossas reflexões envolvendo o comportamento de

partículas em um universo microscópico. O cientista E. Schrödinger resolveu a equação fundamental da MQ e ofereceu possibilidades de investigar as probabilidades de se encontrar uma partícula no limite de duas barreiras de estados de energia. Abaixo apresentamos as equações do cientista para a partícula (MAHAN; MYERS, 1995) em uma dimensão (eq. 7) (p. 281) e em três dimensões (eq. 8) (p. 282).

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \frac{d^2\Psi}{dx^2} + V\Psi = E\Psi \quad (\text{eq. 7})$$

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2m} \left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2} \right) + V\Psi = E\Psi \quad (\text{eq. 8})$$

É importante destacar que, por meio da equação de Schrödinger, foi possível compreender questões entorno do átomo de hidrogênio, bem como o comportamento de sistemas atômicos mais complicados, considerando a pertinência do aparecimento de números quânticos orbitais e número quântico relacionado ao spin do elétron (MAHAN; MYERS, 1995). Obviamente, há inúmeros outros aspectos matemáticos e filosóficos para serem discutidos entorno das contribuições do referido cientista, mas não entraremos em detalhes aqui. Ademais, é imprescindível que pensemos sobre como toda a trajetória histórica dessa teoria apresentou a necessidade de considerar o limite das observações realizadas, e como a natureza dos fenômenos quânticos carregava um diálogo de probabilidades, como já discutimos anteriormente.

3.1.3.1 Aprendizagem do conceito elétron e sua relação com a Mecânica Quântica

Como já pontuamos algumas discussões acima, o conceito de elétron se desenvolveu ao longo da história ante uma perspectiva de que havia uma partícula que parecia colocar barreiras diante da tentativa de compreender o comportamento da matéria. Com isso, muito se pensou em maneiras que pudessem aproximar um modelo com fenômenos do mundo concreto, a fim de tornar possível a compreensão entorno do tal objeto de estudo.

Se pensarmos acerca da relação entre o caminhar histórico nas proximidades do elétron, e a abordagem dele no processo de ensino-aprendizagem, podemos dizer que, nos dois contextos, o referido conceito está sob a necessidade de representar o que se compreende. Sabemos que se desejamos representar algo, podemos delinear um conjunto de palavras, por exemplo, que possam alcançar a ideia que almejamos representar (com uma descrição simples ou usando metáforas, analogias ou alegorias). Aqui, é importante pensarmos sobre o que se

entende por modelo, o qual não se trata de uma réplica da realidade, mas sim de uma representação, e são os aspectos em comum entre o modelo e a realidade que nos ajuda a entendê-la (MORTIMER, 2000 apud GOMES; OLIVEIRA, 2007). No entanto, nesse campo, é possível encontrar alguns obstáculos, se tomarmos como reflexão um ponto de discussão que Paulo e Moreira (2011) nos apresentam. Os autores apontam como a linguagem é uma ferramenta importante no ensino da MQ, e como ela também pode ser um elemento que demanda um pensamento crítico, uma vez que quando se pensa em descrever um fenômeno, o indivíduo terá como base termos que se desenvolveram no seu cotidiano, e esses termos fazem parte de uma linguagem baseada em fatos, porém, sabemos como a MQ demanda raciocínios que caminham para o campo da abstração.

Temos um encontro conflituoso entre as ferramentas para compreendermos fenômenos na MQ e o campo de conceitos utilizado para discutir-se a compreensão desses fenômenos. Mas devemos pensar que tais obstáculos devem ser levados como oportunidade de reflexão a respeito de quais aspectos podem ser trabalhados sob uma ótica de criticidade, e que nos leve a uma posição de superação das limitações conceituais e imagéticas, percebendo potencialidade no que Ostermann e Prado (2005) destacam: “Essas dificuldades parecem surgir justamente onde conceitos como entendimento, significado ou sentido são aplicados” (p. 194).

Quando discutimos marcos importantes na trajetória de desenvolvimento da MQ, pudemos perceber como esta esfera da ciência implicou na necessidade da introdução de uma nova maneira de pensar e de narrar as descobertas científicas, pois o que se percebia e analisava não encontrava mais suporte nos conceitos científicos que se costumava usar. Quando formulamos questões dentro do estudo da MQ, é importante considerarmos que estamos a lidar com conceitos que se afastam da nossa experiência no mundo, e então nos colocamos em conflito com o novo conhecimento que estamos lidando. Isso é um ponto que pode nos fazer refletir sobre o quanto o conceitual e o epistemológico são pertinentes nessa conexão entre campos conceituais (OSTERMANN; PRADO, 2005).

Em Heisenberg (1996), podemos observar a descrição de parte de um diálogo entre o autor e o cientista Bohr, quando eles conversam sobre a estrutura interna do átomo e a dificuldade de compreendê-la, dada a ausência de uma linguagem para lidar com ela, e então damos destaque ao que Bohr responde: “– Penso que ainda seremos capazes de fazê-lo. Mas, nesse processo, teremos que aprender o que significa a palavra ‘compreender’” (p. 55). Quando pensamos no estudo dessa ciência, podemos perceber que o próprio desenvolvimento

dela incorporou a si uma lógica que não atribuía certezas ao mundo, mas que demandava, cada vez mais, uma perspectiva que pudesse transcender a realidade.

Como já demos destaque sobre a linguagem como ferramenta importante no ensino da MQ, cabe refletirmos acerca do que nos apresenta Heisenberg (1995 apud PAULO; MOREIRA, 2011, p. 423) sobre como a formação de imagens mentais podem ser influenciadas por vocábulos, e “que podem ser utilizadas para representar, na linguagem, partes da realidade de maneira muito mais clara do que as construções lógicas por si propiciam”. Assim, considerando esse jogo de influências, é interessante que reflitamos sobre os elementos utilizados na comunicação, e como eles podem ser uma ponte ou um obstáculo para o processo de reflexão crítica acerca do elétron na MQ.

Pantoja, Moreira e Herscovitz (2011) fizeram um trabalho interessante ao realizar uma revisão de literatura em alguns periódicos, e construir classificações para as publicações selecionadas, considerando a perspectiva de Ensino em Mecânica Quântica. Algumas categorias pontuadas pelos autores podem nos fornecer elementos que dão subsídio para as questões colocadas aqui em reflexão, como os obstáculos encontrados no ensino de conceitos sobre um solo de abstração.

Dentro da categoria de propostas didáticas, podemos citar a utilização da ferramenta didática *electronium* para o ensino de conceitos da MQ a partir de concepções prévias dos estudantes, cuja ação é justificada pela dificuldade de aprendizagem do modelo probabilístico, pois os estudantes compreendem o elétron como uma partícula clássica, a medição sobre uma perspectiva clássica e a probabilidade associada apenas a possíveis erros de medição (BUDDE *et al.*, 2002 apud PANTOJA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2011).

Citamos também a utilização do experimento de dupla fenda para elétrons com estudantes do Ensino Médio, tendo potencialidade para discussão de tópicos importantes referentes ao Princípio da Incerteza de Heisenberg, destacando que tal perspectiva parece possibilitar o que as imagens semiclássicas nos livros não o fazem, como uma maior coerência com a MQ e o comportamento de objetos quânticos (JOHANSSON; MILSTEAD, 2008 apud PANTOJA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2011).

Na categoria de implementações de propostas didáticas, podemos destacar um curso de nível introdutório no Ensino Superior para ensinar aspectos conceituais da MQ. Para isso, utilizou-se do contexto de laboratórios virtuais para dar suporte a uma conceitualização e uma formalização do conteúdo posteriormente. Pontua-se que tal metodologia teve o intuito de proporcionar que os alunos extrapolassem concepções da Física Clássica para a Física Quântica, e, para isso, buscou-se enfatizar aspectos da Mecânica Quântica que muito diferiam

dos da Mecânica Clássica (MÜLLER; WIESNER, 2011 apud PANTOJA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2011).

Salientamos também a implementação de um minicurso envolvendo os fundamentos da MQ para um grupo de estudantes do Ensino Médio baiano. Antes e após o minicurso, utilizou-se da observação participante para estudar as concepções de uma parte dos estudantes, em termos da natureza preditiva da MQ e de seu caráter intrinsecamente probabilístico. Posteriormente, o minicurso foi reformulado e direcionado a um outro grupo de estudantes. Declara-se que o estudo apresentou resultados positivos em termos de uma aprendizagem significativa sobre a diferenciação do conceito de probabilidade e da percepção da natureza preditiva da MQ (CARVALHO NETO *et al.*, 2009 apud PANTOJA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2011).

As pesquisas em Ensino em Mecânica Quântica podem nos apontar um horizonte muito vasto quanto às metodologias usadas para o ensino das concepções (PANTOJA; MOREIRA; HERSCOVITZ, 2011) que são parte do que foi uma verdadeira revolução científica do século XX. E é justamente por esse campo da ciência apresentar um caráter com obstáculos a serem enfrentados no âmbito conceitual e epistemológico que se deve buscar metodologias que proporcionem uma maior dialogicidade crítica, em termos do que torna esse conhecimento imperativo a um aprofundamento de sua compreensão.

Se estamos a lidar com questões da ciência que proporcionam em nós reflexões acerca dos conceitos, precisamos pensar sobre quais aspectos, na posição do estudante, podem potencializar essas reflexões, possibilitando um processo crítico de construção de significados. Paulo e Moreira (2011, p. 430) oportunizam algumas reflexões entorno do conceito de dualidade, dizendo que para levar este para o universo do real, “não basta um traço de junção ou o acréscimo da palavra ‘e’ entre os dois adjetivos, formando o termo ‘onda-partícula’ ou ‘onda e partícula’”, pois, os autores declaram que, assim, significaria fazer uso de termos do nosso universo para definir termos de um universo ao qual não podemos ver. É preciso buscar meios de transcender o pensamento quando a nossa linguagem cotidiana estiver diante de fenômenos de um mundo microscópico, haja vista que é necessário traçar uma rota para uma lógica que foge da nossa experiência habitual.

3.2 UTILIZAÇÃO DE TEXTOS DE FICÇÃO PARA O ENSINO DE CONCEITOS CIENTÍFICOS

Desde que o ser humano vive em sociedade, ele se interessa por questões que fogem de sua realidade, logo, necessita de ferramentas que lhe permitam idealizar a respeito desses aspectos, uma vez que isso possibilitaria aproximá-los de sua experiência. Com isso, podemos pensar como faz-se importante o uso de uma certa ferramenta: a imaginação. O ato de pensar sobre o que foge do nosso cotidiano desperta em nós a necessidade de um diálogo entre as relações com o mundo e a relação que estabelecemos com o nosso interior.

No desenvolvimento dessas relações, adquirimos as experiências necessárias para edificarmos a nossa história. A isso, podemos começar a refletir a respeito de como a literatura é construída a partir do entrelaçar de consciências que o indivíduo tem no mundo, e transpõe para as palavras. Coelho e Santana (1996 apud LINSINGEN, 2008, p. 16) nos oferece um apoio para entender a literatura, quando nos dizem que a partir da palavra, direcionada para a experiência do real, podemos pensar na literatura como “expressão essencial do ser humano em suas relações com o outro e com o mundo (ou com a natureza em geral)”. Assim, a literatura parece suportar um campo fértil para a comunicação entre as várias facetas das relações de vida.

Se fizéssemos uma comparação com um caminho percorrido pela ciência e um caminho percorrido pela literatura, poderíamos raciocinar sobre como esses dois percursos podem tecer uma teia que pode se encontrar em inúmeros pontos. Em Gomes, Amaral e Piassi (2010) podemos pensar sobre como a característica do pensamento na ciência e da sensibilidade na arte podem estar lado a lado e se encontrarem nos aspectos de ousadia, crítica e imaginação. Se essas características se fazem presentes no decorrer da trajetória desses conhecimentos, há de encontrarmos a possibilidade de uma potencialização de um conhecimento quando essas áreas se deparam. Os autores em questão nos referenciam sobre o polímata Leonardo Da Vinci, e como ele foi sinônimo de genialidade ao atuar no campo da arte e da ciência.

Na História da Ciência, podemos encontrar cientistas que tiveram a ousadia de introduzir a vertente filosófica nas suas pesquisas científicas, que foi o caso dos cientistas Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger, cujos proporcionaram um diálogo entre ciência, literatura e filosofia em suas obras (GOMES; AMARAL; PIASSI, 2010). O entrelace entre essas áreas do saber foi de grande importância para que houvesse uma maior confrontação dos assuntos investigados por esses cientistas, uma vez que perpassavam por uma via significativamente abstrata.

Sabemos que a literatura se constitui por diversos caminhos, quando pensamos nos inúmeros tipos de gêneros textuais que podemos encontrar. Mas, aqui, daremos ênfase a um

tipo de gênero: a ficção. Linsingen (2008) discute sobre a literatura infantil, e nos guia a refletir sobre aspectos elevados presentes nos textos ficcionais, comentando que esse tipo de texto “oferece a chance de se ler sobre a leitura” (p. 17). A literatura – uma linguagem que nos induz, constantemente, a exercer associações – não acontece apenas por um encontro de léxicos, mas está, sobretudo, se desenvolvendo entre o dito e o não dito. Nisso, encontramos o papel do(a) leitor(a) em refletir e visualizar o que a escrita lhe apresenta. Em um texto ficcional, o(a) leitor(a) deve encontrar possibilidades de exercer uma postura de interpretar e levantar críticas sobre o que está interagindo (LINSINGEN, 2008), visualizando possibilidades de dialetizar sobre o que faz parte da sua realidade com o que a narrativa lhe apresenta.

No âmbito de racionalizar sobre a nossa realidade e aquilo que escapa da nossa percepção imediata, podemos começar a refletir sobre a aprendizagem de conceitos científicos, partindo do que nos apresenta Kosik (1976 apud FERREIRA, 2016) ao dialogar sobre as divergências entre o conhecimento comum e o racionalismo, considerando que este observa a realidade como um constructo do pensamento, enquanto aquele liga-se à experiência imediata do que está a interagir. Na vivência com esses dois tipos de conhecimento, os indivíduos se apropriam de um determinado discurso, para que possam estabelecer uma comunicação dentro de um determinado grupo. Nesse campo, cabe trazer algumas reflexões propostas por Ferreira (2016) ao discutir a respeito de aspectos do discurso ficcional na ficção científica – que é um tipo de ficção –, quando ele aponta sobre o convite que tal discurso faz a uma racionalidade científica, e quando o autor se apoia em Suvin (1979) para fazer uso da expressão *estranhamento cognitivo* como reflexo do diálogo entre os elementos de tal narrativa.

E é entorno dessa gênese de comportamento cognitivo que devemos pensar nas possibilidades de aprendizagem de conceitos científicos a partir de textos de ficção. A abstração dos conceitos no campo da ciência pode encontrar oportunidades de abordagem na utilização de ferramentas que proporcionem a racionalização dos elementos disponíveis até uma trajetória de construção de significado para tais conceitos. Nas decorrências que a literatura – destacando a ficcional – se constrói, diante da experiência humana, encontramos um incentivo a enxergar uma realidade para além, e é nesse movimento que Pêcheux (2012 apud FERREIRA, 2016, p. 78) apresenta um raciocínio esclarecedor quando nos diz que “todo enunciado é intrinsecamente suscetível de tornar-se outro, diferente de si mesmo, se deslocar discursivamente de seu sentido para derivar para um outro”.

3.2.1 Alice no País do Quantum: a Mecânica Quântica através da metáfora de Alice

A princípio, destacamos que a obra que irá fundamentar nossas discussões foi inspirada em uma das obras clássicas literárias, Alice no País das Maravilhas, cuja foi escrita em 1865, pelo romancista, poeta e matemático britânico Lewis Carroll (SEQUEIRA; TEIXEIRA, 2015). A obra se constitui pela jovem Alice que, através de um sonho, cai na toca de um coelho e vai parar em um mundo fantasioso (RESCH, 2011 apud SEQUEIRA; TEIXEIRA, 2015).

Como já demos início a discussão, sabemos que existem aspectos entorno da ciência e da literatura que possibilita entre elas um elo de comunicação. Lima e Ricardo (2015) nos introduz em uma discussão ao pontuar sobre como uma área de imaginação é o lugar onde um cientista e um literário se encontram para dar espaço a um momento de arte e de criação. Nesse lugar em comum, podemos refletir a respeito da obra Alice no País do Quantum – caracterizada como um gênero de ficção –, e dos elementos que estruturam o corpo textual.

Se os sujeitos, inseridos em uma determinada realidade, configuram-se para estabelecer comunicações nesse meio, faz parte desse processo uma linguagem específica que simbolize como o mundo é compreendido a partir desses campos. Com isso, podemos pensar sobre como a ciência física e a literatura podem ser traduzidas na utilização de modelos e na elaboração de um jogo de metáforas, respectivamente (MECKE, 2004 apud LIMA; RICARDO, 2015). Se voltarmos nosso olhar para a compreensão do que são as metáforas, podemos percebê-las como uma figura de palavra⁸ que nos oportuniza “compreender e experimentar um tipo de coisa em termos de outra” (LAKOFF, JOHNSON, 1980 apud LIMA; RICARDO, 2015, p. 580). A física não possui uma maneira de interpretar o mundo que seja sinônimo da maneira como a literatura o faz, mas pode navegar pelas entrelinhas de um texto literário, cujo pode fazer ascender, como racionaliza Lima e Ricardo (2015), elementos que se destinem a um horizonte que se pretende alcançar, como a compreensão de um conceito científico.

A obra Alice no País do Quantum se concebe a partir do momento em que a personagem principal vai parar no País do Quantum, onde tudo o que acontece ao seu redor se apresenta com aspectos do mundo quântico, cujos fundamentos fogem do que estamos acostumados a lidar no mundo real. Na narrativa, encontramos semelhanças com a obra que serviu de inspiração, considerando que, às vezes, Alice é uma observadora, e outras ela faz parte dos personagens que interferem nas situações. Mas, diferente do País das Maravilhas, o

⁸ <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/portugues/figuras-de-linguagem>> acessado em 16 de abr. de 2021.

País do Quantum mostra aspectos de um mundo que todos nós fazemos parte. O enredo, desenvolvido sob um gênero de ficção, questiona características de um mundo que é real, embora apresente a nós sensações de estranhamento (GILMORE, 1998). E é justamente nesse âmbito que percebemos o desenvolvimento de uma narrativa sob os critérios de uma mistura de fantasia e fábula, como já caracterizamos na introdução.

Como já introduzimos sobre a possibilidade de a ciência caminhar pelas entrelinhas de um texto literário, vamos refletir a respeito de como a obra de Gilmore (1998) utiliza de sua narrativa para trabalhar conceitos da mecânica quântica – e isso pode nos fazer pensar sobre a obra como uma narrativa de divulgação científica. Conforme a narração acontece pelas páginas da obra, podemos perceber que os nomes dados aos capítulos (como O Banco Heisenberg, O Instituto de Mecânica etc.), e as ilustrações que acompanham a escrita (apresentamos um exemplo na Figura 8), são alguns dos aspectos que convidam o(a) leitor(a) a racionalizar fenômenos do mundo quântico a partir de um discurso ficcional com base na obra original de Alice no País das Maravilhas.

Figura 8 – A personagem Alice observando os elétrons atravessarem as fendas



Fonte: Gilmore (1998, p. 51).

O autor coloca um discurso, acompanhado da ilustração, que apresenta Alice tendo um diálogo com dois personagens: o Mecânico Clássico e o Mecânico Quântico. O aspecto atrativo da narrativa está em como a fala desses personagens influencia na maneira como Alice percebe o comportamento dos elétrons e lança indagações sobre o que observa. A isso, cabe pensarmos nesse campo de interação entre os aspectos científicos e os ficcionais, e como

o que cada um pode oferecer suscita na construção de um plano de apoio que convida o(a) leitor(a) a trabalhar sua imaginação e criticidade para questionar o comportamento de partículas em um universo microscópico.

3.3 A SEMIÓTICA DE CHARLES PEIRCE E O ENSINO DE QUÍMICA

O mundo ao nosso redor nos envolve a partir de experiências, as quais são responsáveis por estimular em nós pensamentos e formas de interpretar o mundo. É só a partir de quando nos lançamos ao mundo para conhecê-lo que podemos nos lançar a ele para modificá-lo. E, diante de cada época em que o ser humano se envolve nessas experiências, há elementos a serem destacados. D. Melo e V. Melo [2015] ressaltam como desde a época em que o ser humano vivia em cavernas ele desenvolve maneiras de manipular aspectos em seu ambiente, como cores e formas, expressões etc., e isso se configura como crucial para o estabelecimento de uma comunicação com os outros seres ao seu redor. E é nessa perspectiva de elementos que carregam uma representação de algo para um determinado grupo que começaremos a refletir sobre os *signos*.

Para compreendermos como um signo se fundamenta, podemos nos apoiar em Simões (2009a), quando ela discorre que um signo se caracteriza por estar no lugar de uma outra coisa – como se ele pudesse ser o que a autora chama de sinal –, e que pode ser um objeto concreto (integrante de nossa realidade) ou um conceito abstrato (não pertence a nossa experiência cotidiana). Para dar início a nossa reflexão, começaremos discutindo sobre a filosofia de Charles Sanders Peirce (1839-1914). Na compreensão desta filosofia, é interessante adentrarmos um pouco em uma parte de seu modo de organização. Martins (2015) discute sobre como Peirce (2010) atribui à *Segunda Tricotomia* da sua teoria como a divisão mais importante, cuja engloba os conceitos de *ícone*, *índice* e *símbolo*. E será sobre estes que iremos nos debruçar.

Ao pensarmos nos signos, precisamos refletir em como eles se constituem, e o que exercem nos processos aos quais fazem parte. Ponzio (2007 apud MARTINS, 2015) afirma que “o significado de um signo é o interpretante desse signo, é a sua tradução em outro signo” (p. 243). O signo e o processo ao qual ele faz parte desencadeia um conjunto de operações, uma vez que o ser humano se comunica e estabelece relações cognitivas a partir disso. Santaella (1983 apud WARTHA; REZENDE, 2011, p. 283) designa associações entre o signo e o objeto, declarando que “(...) a primeira representação mental daquilo que o signo indica é denominada *objeto imediato*”, cujo, através de uma relação triádica, pode oferecer o que a

autora chama de interpretante, refletindo-se na formação de um outro signo mental. Wartha e Rezende (2011), apoiando-se nas ideias de Peirce, declaram que os processos dialéticos envolvendo os signos no mundo real são caracterizados como *semiose*.

Peirce (1894 apud JORGE, 2007) nos apresenta a respeito dos três tipos de signos que citamos anteriormente: os ícones (semelhança), que são compreendidos por expressar ideias correspondentes ao que eles representam; os índices, que correspondem a uma indicação em relação ao que estão associados; e os símbolos, que se trata de se associar a um significado de uso de uma determinada coisa. Quando pensamos nas ações desses signos na mente, podemos estabelecer relações com o ensino, que, devido ao seu nível de abstração, adquire significados a partir de um conjunto de representações e interpretações.

Podemos refletir sobre a importância da compreensão da ação dos signos, na realidade de um sujeito, ao destacarmos como conceitos abstratos podem ser trabalhados na mente de um estudante, uma vez que ele precisa partir de sua experiência para construir um significado sobre o que lhe é apresentado. Nesse âmbito, faz-se pertinente destacarmos sobre as representações mentais, cujas são tratadas, nas Ciências Cognitivas, como “construções hipotéticas que são utilizadas pelos estudantes para explicar ou compreender um fenômeno, nas quais pode diferir muito em seu conteúdo, mas não em seu formato representacional (...)” (WARTHA; REZENDE, 2011, p. 276). Aqui, cabe levarmos em conta que as representações mentais podem ser uma ferramenta que contribua no processo de significação, ou que coloque obstáculos diante deste, que se caracterizam como signos do tipo ícone ou signos icônicos. No próximo tópico, apresentaremos como signos icônicos podem influenciar nos processos de *semiose* a partir da teoria da iconicidade verbal (SIMÕES, 2009a).

3.3.1 A Teoria da Iconicidade Verbal

Como já discutimos sobre a abstração na Química, podemos estabelecer algumas relações com o que Wartha e Rezende (2011) pontuam sobre as representações no processo de ensino e aprendizagem em Química. Os autores destacam a importância do desenvolvimento da imaginação, haja vista que é imperativa a capacidade de criar maneiras de explicar os modelos de átomos, moléculas e transformações químicas, por exemplo. Com isso, podemos raciocinar que o conhecimento químico, como qualquer outro conhecimento, ao ser apresentado ao estudante, passa por um sistema de manipulação, em que deve ser atribuído a ele sentidos e significados através de signos.

No âmbito da abstração, coloca-se em execução o uso de códigos que possam estruturar uma representação de tais informações, uma vez que “as pessoas não captam o mundo exterior diretamente, elas constroem representações mentais e internas dele” (EISENCK; KEANE, 1990 apud WARTHA; REZENDE, 2011, p. 277). Assim, as representações parecem um alicerce para quando discutimos sobre interpretar aquilo que se configura em uma outra instância. É importante destacarmos o que apresenta Wartha e Rezende (2011) quando dialogam sobre as representações internas ou mentais e as representações externas ou semióticas, ao declarar que o diálogo entre tais representações se dá através de como as representações externas são ferramentas pelas quais um indivíduo pode apresentar suas representações mentais. Se estamos dialogando sobre ideias representativas, precisamos retornar a discutir a respeito do que já fizemos algumas pontuações: a relação sígnica do ícone. É imprescindível que consideremos o que declara Peirce (2010 apud MARTINS, 2015, p. 247) sobre a identidade do ícone, que se caracteriza por “manter uma relação de semelhança com o ‘outro’ que ele denota”. Para aprofundarmos nossas discussões, em termos de uma potencialidade icônica dos signos, nos apoiaremos na Teoria da Ironicidade Verbal.

Para adentrarmos nos aspectos da TIV, buscaremos apoio entorno de reflexões no campo da linguística. Simões (2009a) nos insere em um diálogo sobre como a natureza semiótica de um texto se estrutura com os elos estabelecidos entre o produtor do texto, a função lexicológica-semiótica e o leitor, frisando que as palavras têm a função de evocar imagens conforme a imaginação do leitor é estimulada. A partir do caminho entre o que um texto apresenta, e os processos de significação aos quais os signos são submetidos para gerar outros signos, podemos encontrar na TIV, como pontua a autora em questão, subsídio para compreender sobre a relação entre a estrutura textual e os processos cognitivos.

Ao depararmos-nos com um texto, o qual se pautou na seleção de léxicos que pudessem oferecer suporte para a comunicabilidade almejada, podemos refletir sobre como os tipos de iconicidade, segundo a TIV, carregam suporte para a compreensão da materialização dos signos referentes (imagens mentais) no pensamento dos estudantes. Em Simões (2009a), encontramos cinco tipos de iconicidade: diagramática, lexical, isotópica, alta ou baixa iconicidade e eleição de signos orientadores ou desorientadores. No entanto, daremos ênfase apenas às três primeiras. Apresentaremos alguns exemplos para dar suporte a um melhor entendimento das discussões feitas mais adiante.

Para pensar a iconicidade lexical, Simões (2002 apud SIMÕES, 2009a, p. 108) apresenta um trecho do conto *Tresaventura*, de Guimarães Rosa:

Dja tornou sobre si, de trabuz, por pau ou pedra, cuspiu na cobra. Atirou-se uma pedrada paleolítica, veloz com o amor. Aquilo desconcebeu-se. O círculo abrupto, o deslance: a cobra largara o sapo, e fugia-se assaz, às moitas folhucas lefe-lefe-lehepte, como mais as boas cobras fazem.

No trecho, podemos perceber palavras-chave como *desconcebeu-se* e *deslance* que, segundo Simões (2009a), funcionam como pistas icônicas à medida que se localizam no corpo textual, trazendo para o interior do vocábulo um aspecto que corrobora a nossa interpretação.

Na iconicidade diagramática, podemos considerar o exemplo de Simões (2009a, p. 109) de um recorte do jornal O Globo, na data de 10/03/2005, que dizia que “dólar baixo não derruba balança; Brasil vai exportar mais este ano”. Os termos *dólar baixo* e *exportar mais*, organizados no texto, apresentam uma similaridade entre o signo e o objeto imediato, considerando que a ordem com que são apresentados estruturam uma comunicação para o texto (SIMÕES, 2009a).

Considerando a iconicidade isotópica, podemos tomar nota do poema *Envelhecer*, de Mario Quintana, apresentado por Simões (2009a, p. 128):

Antes, todos os caminhos iam.
Agora todos os caminhos vêm.
A casa é acolhedora, os livros poucos.
E eu mesmo preparo o chá para os fantasmas.

Os elementos como *antes*, *agora*, *caminhos*, *casa*, *livros*, *eu*, *chá* e *fantasmas* são entendidos como “pegadas” postas no texto para que o(a) leitor(a) possa se situar na trilha temática, oferecendo um relevo para a interpretação (SIMÕES, 2009a).

É importante que consideremos que tais níveis de iconicidade não acontecem de maneira isolada, mas sustentam-se um no outro para estruturar o projeto de comunicação.

Com isso, podemos pensar que a esfera de abstração na Química pode rolar pela malha da iconicidade textual à medida que percebemos a importância das representações nessa ciência, e buscamos entender como elas operam na gênese de raciocínios durante o ensino e aprendizagem de conceitos científicos. Partindo da obra *Alice no País do Quantum*, e considerando como a narrativa de fantasia e fábula tem o objetivo de que o(a) leitor(a) se questione sobre acontecimentos em um universo quântico, percebemos potencialidades para se trabalhar o elétron sobre os fundamentos da TIV. Como discutimos acima, essa teoria suporta bases para analisar como os níveis da função icônica de um signo pode oferecer ao estudante ferramentas durante o diálogo das representações mentais com as representações semióticas.

4 METODOLOGIA

O caminho por onde uma pesquisa é construída considera como fundamental a definição dos métodos a serem utilizados para que se possa alcançar (ou tentar) o conhecimento almejado. Uma vez que a trajetória a ser percorrida pode ser visualizada, estabelecendo um elo com uma metodologia científica, Gil (2008, p. 26) nos introduz a possibilidade de “obtenção de novos conhecimentos no campo da realidade social”. Dentro das viabilidades dos novos conhecimentos, Selltiz *et al.* (1967 apud GIL, 2008) nos auxilia a refletir sobre as marcas características que fazem parte de determinados níveis de pesquisa, como, por exemplo, os estudos exploratórios.

As pesquisas exploratórias consistem em “desenhar” uma nova visão para o problema de pesquisa já definido, examinando a possibilidade de uma maior exploração de assuntos pouco sondados, e que possam gerar hipóteses para os próximos estudos (GIL, 2008). Dessa forma, ainda podemos pensar sobre a delineação da pesquisa científica, e que Gil (2008) também nos relata, como, por exemplo, um estudo de caso - refletindo os meios técnicos pelos quais o(a) pesquisador(a) irá conduzir sua investigação. Como característica de um estudo de caso, Gil (2002, p. 55) aponta o de “proporcionar uma visão global do problema ou de identificar possíveis fatores que o influenciam ou são por ele influenciados”.

Como aspecto também pertencente à trajetória de uma pesquisa, podemos considerar a natureza dos procedimentos analíticos, que, em Gil (2008), relata-se sobre a natureza qualitativa dos estudos de caso. Algumas características de análise qualitativa são consideradas por Tesch (1990 apud GIL, 2008), como um processo guiado por uma atividade reflexiva, uma análise cíclica e concomitante à coleta de dados, a promoção de uma explicação para as unidades relevantes encontradas, a não existência de uma manipulação rígida dos dados encontrados etc.

Com base nas ideias discutidas acima, este trabalho foi conduzido por meio de um estudo exploratório, fazendo uso de uma metodologia de caráter qualitativo, apoiando-se nos procedimentos técnicos voltados para a análise de um estudo de caso. O estudo envolveu a aplicação de uma intervenção com recortes do livro *Alice no País do Quantum*.

Diante da situação da pandemia de COVID-19, causada pelo novo coronavírus, entre os anos de 2020 e 2021, esta pesquisa teve uma coleta de dados totalmente no formato remoto, sendo executada a partir da utilização de ferramentas digitais. No tópico seguinte, detalharemos como os procedimentos foram realizados diante dessa perspectiva.

4.1 COLETA DE DADOS

Para a obtenção dos dados a serem analisados durante a pesquisa, utilizamos como base uma intervenção realizada no formato de uma oficina, em dois momentos de forma síncrona, com a utilização do aplicativo Google Meet. Cada momento síncrono teve a duração de 2 horas, em que se proporcionou aos alunos participantes que externalizassem a respeito das discussões realizadas. A pesquisa foi executada com alunos(as) do curso de Licenciatura em Química, da Universidade Federal de Pernambuco – Campus Agreste. Os participantes se configuraram como estudantes do 5º ao 10º período, dentre esses havendo estudantes que já tinham cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica, e que ainda não tinham cursado. No formato de oficina, os participantes tiveram que realizar uma inscrição, e receberam um certificado com carga horária (10h). Foram disponibilizadas em torno de 25 vagas.

Os momentos de intervenção se caracterizaram pela realização de debates, que foram baseados na exibição de dois vídeos e em uma exposição dialogada a respeito do assunto abordado nos vídeos, tudo de forma síncrona. De forma assíncrona, outras atividades fizeram parte da intervenção, para dar suporte às discussões que foram conduzidas de forma síncrona e que geraram os dados da presente pesquisa. As atividades assíncronas foram realizadas com a utilização do aplicativo Google Classroom e Google Forms.

Os debates realizados de forma síncrona foram registrados por meio da ferramenta de gravação presente no aplicativo Google Meet. Além disso, tiveram momentos síncronos da intervenção com a realização de atividades que envolveram escrita e experimentação com desenho. Entre os dois momentos síncronos, que se constituíram na aplicação das atividades, solicitou-se a leitura individual de alguns trechos pré-selecionados da obra Alice no País do Quantum. Esses trechos se tratou de intervalos de páginas, separados em quatro arquivos, que contemplavam ideias relacionadas às discussões feitas no primeiro momento síncrono. Devido à quantidade de páginas, não iremos disponibilizá-las nos apêndices.

Nos APÊNDICES A e B, apresentamos o planejamento em forma detalhada da intervenção a partir de planos de aula.

4.2 ANÁLISE DE DADOS

Dado que o estudo da Semiótica se destina aos signos de múltiplas naturezas, incluindo os linguísticos, é importante refletirmos, aqui, sobre o funcionamento dos signos no

interior dos textos. E embora a Semiótica de Pierce (1894 apud SIMÕES, 2009a) categorize os signos como ícones, índices e símbolos, daremos ênfase às marcas icônicas dos signos (SIMÕES, 2009a). Seguindo os passos da mesma autora, podemos pensar sobre a Teoria da Iconicidade Verbal como uma investigação do diálogo entre processos cognitivos e estrutura textual, dando destaque para uma ótica à materialidade do signo, no sentido de que nós, como seres de sentidos e significados no mundo, formamos imagens mentais ao interagirmos com objetos e pessoas, o que dá subsídio ao que Simões (2009a) declara ao nos dizer que “o ícone é fonte primária do signo” (p. 69), pois, os objetos são representados por códigos que se estruturam mentalmente.

Para a realização da análise, consideramos que os participantes da pesquisa serão a fonte dos dados a serem obtidos, e que a estes caberá um olhar crítico e de estabelecimento de relações. Nesse âmbito, podemos levar em conta que a linguagem é o elemento principal que permeia o campo em análise, e Franco (2005) atribui um destaque a essa via de expressão, dialogando sobre o dinamismo interacional entre linguagem, pensamento e ação, e que um olhar de concepção crítica e dinâmica da linguagem fornece um suporte para o que a autora compreende por Análise de Conteúdo. Para a mesma autora em evidência, uma análise de conteúdo deve considerar que as informações obtidas não podem ser apoiadas em um mero solo de descrição, mas precisam se apoiar em um arcabouço teórico, e devem ser trabalhadas sobre os pilares que configuram um pesquisador, como a sensibilidade, a intencionalidade e a competência teórica.

Apoiando-se na Teoria da Iconicidade Verbal, e nos elementos que ela carrega, constituiremos a lente pela qual faremos análises e interpretações acerca do que iremos obter durante os momentos de interação na intervenção didática.

4.2.1 Identificação dos níveis de iconicidade

Pensando na iconicidade diante da comunicação humana, é de suma importância considerarmos as relações de analogia dentro da ideia-objeto representada (SIMÕES, 2009b apud SIMÕES, 2009a), e de como os movimentos do sujeito para compreender o mundo resulta na formação de imagens mentais (SIMÕES, 2009a). Sobre a iconicidade, cumpre então dialogar a respeito das potencialidades existentes nos níveis (ou tipos) de iconicidade nos processos de semiose textual.

Em termos das ideias de Simões (2009a), já discutidas na fundamentação teórica, traçamos os seguintes critérios de análise para identificação dos níveis de iconicidade:

- Iconicidade diagramática: trata-se da arquitetura textual no quesito de combinar os itens lexicais para que possam proporcionar representações. Por exemplo, quando o estudante escolher expressões, que quando organizadas podem representar uma ideia sobre o elétron e o comportamento desta partícula. A participação dos sujeitos nas discussões e, conseqüentemente, nas atividades a serem realizadas, irá demandar a estruturação de ideias que estabeleçam relações com os raciocínios construídos por eles.

- Iconicidade lexical: é um reflexo das combinações características da iconicidade diagramática, uma vez que a seleção dos léxicos reflete as marcas expressivas na mensagem que se busca comunicar. Portanto, espera-se que, nos dados, seja possível identificar os códigos léxicos escolhidos pelos sujeitos da pesquisa para evocar seus raciocínios acerca da compreensão do conceito de elétron dentro do contexto da mecânica quântica, cuja vertente foi de suma importância para o entendimento do fenômeno dualidade onda-partícula. Nesse campo, cabe refletir que as palavras usadas são pontos representativos – peças que unidas constroem a comunicação.

- Iconicidade isotópica: equivale a perceber o uso de palavras e expressões que conduzem uma trilha temática. Nos dados, espera-se que seja possível observar os itens léxicos usados para sustentar as ideias sobre o conceito de elétron em torno da mecânica clássica e da mecânica quântica, por exemplo. Caberá reflexões sobre o uso de certas palavras para expressar as ideias em questão.

Por fim, caberá uma análise à posteriori, que irá se apoiar no objetivo de observar como a manipulação dos signos, considerando a retomada de imagens, figuras, alegorias e metáforas presentes no livro, favoreceu a construção de novos significados no desenvolvimento das atividades durante a intervenção, de acordo com o ponto de vista da Mecânica Quântica acerca da natureza do elétron.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO

Como foi discutido na Metodologia, a coleta dos dados aconteceu por meio da realização de uma oficina, que foi dividida em momentos síncronos e assíncronos. Durante a coleta e análise dos dados, considerou-se os critérios de análise que já haviam sido predefinidos. Com um cenário de estudantes do 5º ao 10º período, totalizando 24 inscritos – com estudantes que havia cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica, e que não havia cursado ainda –, pôde-se refletir a respeito de similaridades e distinções envolvendo os níveis de iconicidade entre os discursos desses indivíduos. As discussões realizadas foram planejadas a fim de possibilitar a emergência dos níveis de iconicidade envolvendo o conceito de elétron.

A partir da Teoria da Iconicidade Verbal, e observando como os níveis de iconicidade configuraram as falas dos participantes da oficina, foi possível perceber que os tipos de iconicidade não se apresentaram de forma isolada durante os momentos da intervenção, mas sim de maneira concomitante. Não obstante, os níveis de iconicidade apoiaram-se um no outro a partir da proposta comunicativa de cada indivíduo. Isso refletiu-se na seleção de palavras e expressões que cada estudante fez para comunicar uma ideia, e como a organização dessas palavras e expressões atribuiu uma coerência para o que se almejava expressar. Além disso, quando os estudantes precisaram construir uma fala com o propósito de enunciar uma trilha temática, a seleção das palavras foi de suma importância para que o tema fosse abordado de forma coerente.

A sequência de execução dos momentos da oficina, contando com os vídeos exibidos e as discussões realizadas sobre marcos importantes no desenvolvimento da mecânica quântica, ofereceu um suporte para reflexões a respeito da trajetória acadêmica dos participantes, uma vez que se acredita que este elemento pode ter influenciado na estrutura das falas conforme aconteciam as discussões. Por meio da utilização dos trechos da obra *Alice no País do Quantum*, por exemplo, foi possível pensar sobre como as partes da leitura influenciaram o discurso dos participantes que tinham ou não cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DOS NÍVEIS DE ICONICIDADE TEXTUAL

Ao decorrer dos momentos da oficina, o número de participantes foi diminuindo – nem todas as pessoas que se inscreveram fizeram-se presentes até o fechamento da oficina,

cumprindo com todas as atividades solicitadas. Diante disso, observando a frequência de participação dos estudantes, e o perfil deles, escolheu-se dois participantes como fonte dos dados a serem discutidos com mais detalhes nesse trabalho. O critério de escolha tratou-se de uma estudante que já havia cursado a disciplina Introdução à Química Quântica, e um estudante que não havia cursado ainda.

Apresentaremos um recorte das falas desses estudantes, aos quais chamaremos de A1 e A2, respectivamente, considerando o que tomamos como de mais destaque em termos de níveis de iconicidade que emergiram nas discussões sobre o conceito de elétron. No APÊNDICE C, apresentamos todas as falas dos dois participantes selecionados nas quais identificamos a presença dos níveis de iconicidade para a construção de significados sobre o conceito de elétron.

Para uma melhor organização, dividiremos a análise e discussão dos dados em subtópicos, que se tratam dos momentos realizados durante a oficina.

5.1.1 Primeiro momento síncrono

A oficina intitulada O Conceito de Elétron e a Mecânica Quântica consistiu em discutir sobre personalidades importantes e seus respectivos trabalhos para o desenvolvimento da Mecânica Quântica, dando ênfase ao conceito de elétron a partir do conhecimento desenvolvido por essa ciência. O primeiro momento síncrono aconteceu no dia 21 de setembro de 2021. Para dar início à oficina, direcionou-se algumas perguntas norteadoras aos participantes, a fim de sondar quais conhecimentos eles já possuíam sobre as discussões a serem realizadas. No Quadro 1, apresentamos as perguntas que nortearam os primeiros momentos da oficina.

Quadro 1 – Perguntas norteadoras

Perguntas norteadoras
Quais eram os interesses da Física Clássica até o século XIX?
Quais eram os princípios básicos da Física Clássica?
Como as propriedades da luz eram explicadas até o século XIX?
Houve mudanças nas interpretações sobre as propriedades da luz?
Poderíamos citar pelo menos uma evidência que tenha culminado na necessidade de mudar a maneira como se interpretava os fenômenos da ciência?

Fonte: A autora (2021).

Não faremos uma análise das respostas dos participantes, considerando que até esse momento ainda não tínhamos a presença das categorias de análise delineadas para o conceito de elétron. Porém, essas perguntas possibilitaram conhecer um pouco o perfil dos estudantes, ou seja, o que eles já possuíam de conhecimento acerca do que seria discutido.

Após esse momento inicial, começou-se a explorar o que havia sido planejado para a oficina. Iniciando com um momento expositivo, não houve participação ativa dos estudantes nesse momento. Ao finalizar, foi direcionado aos participantes que respondessem um questionário, cujo deveria ser respondido com base no que havia sido discutido, e nos conhecimentos que cada participante possuísse até aquele momento.

5.1.1.1 Questionário 1

Para a análise das respostas dadas pelos participantes ao primeiro questionário, aplicado ao fim do primeiro encontro síncrono, consideramos os critérios de análise delineados para o conceito de elétron. O questionário foi composto por dez perguntas, que envolveram discussões sobre a compreensão do conceito de elétron mediante o desenvolvimento da Mecânica Quântica. No Quadro 2, apresentamos um recorte das perguntas e respostas que selecionamos para discutir a emergência dos níveis de iconicidade textual.

Quadro 2 – Questionário 1

Perguntas e respostas – Questionário 1
1. Como o conhecimento da Mecânica Clássica poderia descrever o comportamento de partículas? Justifique a sua resposta.
(A1): Através dos modelos atômicos baseados em subpartículas como no caso do modelo de Thompson, porque este modelo é proposto como sendo que o átomo composto por partículas carregadas negativamente encrustadas no átomo maciço. (A2): Acredito, que objetos muito pequenos impossíveis de serem enxergados com o olho humano. Além disso, essas partículas possuíam comportamentos definidos.
2. O conceito de onda e partícula fazem parte da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica? Justifique.
(A1): Na mecânica clássica houve experimentos que mostraram estes dois comportamentos, no entanto, havia discordância quanto a esses comportamentos. Na mecânica quântica foi proposto que estes comportamentos poderiam aparecer

simultaneamente e que experimento poderia favorecer o aparecimento de um destes comportamentos.

(A2): Sim. No entanto, possuem vertentes diferentes, ou seja, visões opostas. Na mecânica quântica, a partir da denominação quantum proposta por Max Planck, e as descobertas subsequentes, foi atestado a possibilidade do elétron possuir comportamento de onda e partícula, e na mecânica clássica ambos comportamentos eram bem diferentes.

3. Como a compreensão da natureza do elétron pode se relacionar com o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

(A1): Por meio do experimento do efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula e dos experimentos da fenda.

(A2): Acredito, que com a afirmação de Broglie a respeito da difração dos elétrons, que pode ser considerada apenas com partículas, e não com corpos grandes.

Fonte: A autora (2021).

Começaremos analisando as respostas dadas por A1, aluna que já havia cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica.

Na pergunta 1, podemos refletir sobre como as iconicidades lexical e diagramática sustentam-se uma na outra para comunicar a ideia expressa pela aluna. Em termos da iconicidade lexical, podemos pensar na palavra “subpartículas” que é associada aos “modelos atômicos”, cujos a aluna faz menção para poder posteriormente falar de como essas subpartículas estão dispostas no modelo atômico de Thomson. A aluna então menciona o “átomo composto por partículas carregadas negativamente”, fazendo-nos pensar que esse seria o comportamento de partículas segundo a Mecânica Clássica. O uso dos termos selecionados pela aluna, e a consequente organização deles na sua respectiva fala, apresentam-nos iconicamente uma intenção, que é fazer-nos pensar as partículas carregadas negativamente a partir do modelo atômico de Thomson.

Na pergunta 2, para comparar a ciência da Mecânica Clássica com a ciência da Mecânica Quântica, A1 utilizou de palavras que serviram como guia para diferenciar essas duas ciências. Ao falar dos experimentos realizados na Mecânica Clássica para pensar o conceito de onda e partícula, logo em seguida é usada a expressão “no entanto”, que nos introduz a considerar o que a aluna chama de “discordância quanto a esses comportamentos”. Para expressar que tais comportamentos são vistos de forma diferente nos experimentos realizados no âmbito da Mecânica Quântica, A1 utiliza o termo “simultaneamente”, nos

guiando a pensar sobre um novo ponto de vista em relação a esses conceitos. A construção da fala de A1 desenvolveu-se sobre palavras que serviram como âncoras sobre o assunto discutido, e que apoiaram a ideia que se almejava comunicar, podendo perceber, assim, o aparecimento concomitante da iconicidade isotópica e lexical.

Na pergunta 3, A1 faz menção ao efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula e experimentos da fenda, nos fazendo pensar sobre a iconicidade lexical a partir da função das palavras para comunicar como a natureza do elétron, que era entendido como partícula, foi colocada em discussão a partir do desenvolvimento da Mecânica Quântica.

O aluno A2 foi aquele que ainda não havia cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica. Na pergunta 1, A2 associa ao comportamento das partículas a ideia de que elas são “objetos muito pequenos impossíveis de serem enxergados com o olho humano” e que também “possuíam comportamentos definidos”. As palavras usadas por A2 constroem a ideia dele a respeito do comportamento de partículas segundo o conhecimento da Mecânica Clássica. Logo, pensamos na iconicidade lexical que emerge dos termos usados para nos fazer pensar sobre o que não se pode ver a olho nu e que possui comportamento definido no espaço.

Na pergunta 2, o aluno introduz a expressão “visões opostas” para discutir que o conceito de onda e partícula não é visto da mesma maneira na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica. Para falar da Mecânica Quântica, A2 expressa o termo “quantum” associado ao cientista Max Planck, comunicando que os estudos desse cientista possibilitaram o comportamento de onda e partícula atribuído ao elétron. Para a Mecânica Clássica, A2 expressa que esses comportamentos eram bem diferentes, nos fazendo pensar que se distanciam da ideia expressa pelo aluno a respeito da Mecânica Quântica. A organização das ideias para direcionar à distinção entre a Mecânica Clássica e a Quântica, e as palavras usadas para dar suporte, apresentam concomitantemente as iconicidades isotópica e lexical.

Na pergunta 3, A2 utiliza da contribuição do cientista De Broglie, associando a ele o fenômeno de difração de elétrons, para expressar que tal comportamento só pode ser observado com objetos pequenos, aos quais ele direciona à ideia de partícula. Os termos utilizados evocam as ideias que se busca comunicar, fazendo-nos perceber a presença da iconicidade lexical.

Dentre as perguntas que foram feitas aos participantes, a última pergunta tratou-se de solicitar a eles que ilustrassem, através de um desenho, as suas respectivas compreensões sobre a partícula elétron. No segundo encontro síncrono, os desenhos feitos foram discutidos com os participantes presentes no momento. O fato de termos utilizado a palavra partícula nessa questão, fez-nos pensar se isso pode ter influenciado no momento de fazer a ilustração.

5.1.2 Questionário 2

A aplicação do Questionário 2 foi realizada durante o momento assíncrono, que aconteceu na semana entre as datas dos encontros síncronos. Para que o questionário pudesse ser respondido, os participantes precisaram fazer a leitura de trechos pré-selecionados da obra Alice no País do Quantum, que foram disponibilizados no Google Classroom, criado para guardar os materiais referentes à oficina.

O questionário continha apenas uma única questão, que solicitava aos participantes que reformulassem, após a realização da leitura, o desenho do elétron que havia sido feito no Questionário 1. Tanto a primeira versão do desenho, como a sua reformulação, foi discutida durante o segundo momento síncrono.

5.1.3 Segundo momento síncrono

O segundo momento síncrono aconteceu no dia 28 de setembro de 2021. Para dar início às discussões desse encontro, apresentou-se as primeiras versões dos desenhos e as suas respectivas reformulações. Cada participante que fez e reformulou o desenho, explicou quais aspectos havia o influenciado durante a produção.

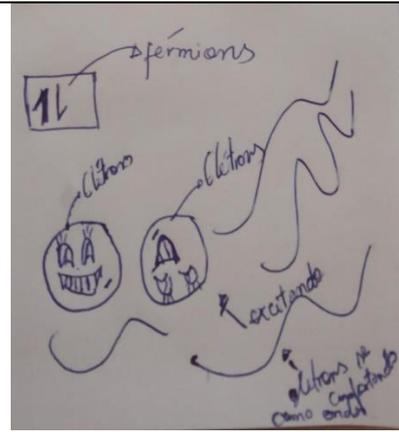
Refletiremos agora a respeito da produção e reformulação dos desenhos dos alunos A1 e A2. Algumas perguntas sobre os desenhos foram feitas durante a oficina, a fim de sondar mais informações sobre o desenvolvimento da ilustração antes e após a realização da leitura dos trechos do livro. No Quadro 3, apresentamos as ilustrações e as respectivas descrições a respeito delas, bem como os diálogos que aconteceram.

Quadro 3 – Os desenhos e suas reformulações

1 ^a e 2 ^a versão do desenho de A1	
1 ^a	2 ^a



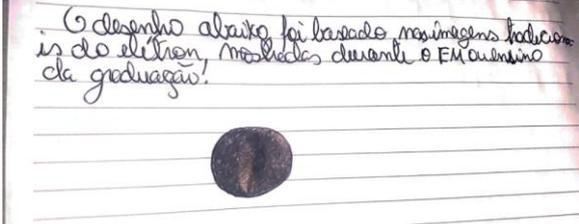
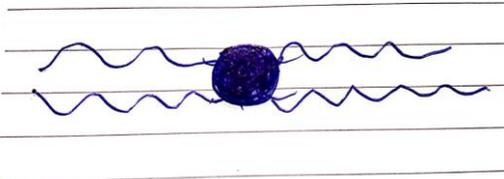
(A1): No primeiro desenho, eu quis fazer uma coisa mais séria, como eu imaginaria que eu fosse representar ao meu aluno: um monte de partículas e um monte de ondas junto que não daria para diferenciar tanto.



(A1): No segundo desenho, eu fiz o zoom. Quando eu tava lendo [...] no texto tem dizendo que os elétrons... Os fótons são os bósons, e os elétrons são os férmions, eles são iguais, então eles têm que estar opostos de alguma forma, aí é por isso que ele explica o Princípio de Pauli. Aí eu quis representar de forma animada, da forma que eu imaginei que seria um monte de elétrons de uma mesma coisa, rindo constantemente, e um de cabeça pra baixo, e o outro. Aí eles se excitam e mostram também essa questão da luz, da onda... Eu imaginei muita coisa, mas fui assim. Aí essa caixinha aí, que é o orbital, eu também quis representar que eles estão aí dentro. Como a gente pensa, né? Dentro dessa região de probabilidade.

Pergunta: Então, quando você fez o primeiro desenho, depois da leitura para reformular o desenho, o que mudou para você? Ou você acha que não mudou nada?

(A1): Mudou, sim. Porque... Eu já

	<p>paguei quântica recentemente, então os conceitos estão bem fresquinhos na memória, e eu também gosto muito dessa parte. No primeiro, eu representaria dessa forma se eu fosse explicar a um aluno a dualidade, para ele entender um pouco sobre ela. Aí no outro eu me inspirei na questão do texto, de ser um pouquinho mais descontraído, mais animado, então eu quis representar dessa forma mais animada, com os elétrons com sorrisos, mas não deixando o conceito. [...]</p> <p>Acho que o que mudou foi só a criatividade no momento.</p>
<p>1ª e 2ª versão do desenho de A2</p>	
<p>1ª</p>  <p>(A2): A primeira imagem eu a fiz na perspectiva da Mecânica Clássica, e eu até coloquei a justificativa que normalmente é a imagem passada pra gente sobre a representação do elétron: normalmente um círculo pintado, aí tem a carga... E foi essa a ideia.</p> <p>Pergunta: Então, depois das discussões que a gente fez no primeiro encontro síncrono, essa era a sua perspectiva? Aí você consegue perceber mais dentro da Clássica?</p>	<p>2ª</p>  <p>(A2): Sinceramente, eu fiquei sem ideia de como representar. Eu tava pensando em representar igual foi... Acho que o primeiro desenho, que tem a representação lá do hidrogênio, com o orbital s e com o plano nodal. Mas, daí eu... Quer saber? Eu vou colocar aqui umas ondas, aí aqui é partícula e onda.</p> <p>Pergunta: Mas, você percebeu que, após a leitura das partes do livro, houve alguma mudança quando você foi representar o elétron?</p>

(A2): Isso. Eu não consegui representar de uma forma que pudesse se representar como partícula e como onda. Tanto é que no segundo desenho é um desenho bem simples.	(A2): Sim, sim, bastante. Porque durante a leitura a gente vai tendo... O elétron, ele é representado de várias formas, então eu fiquei tentando imaginar uma que ficaria fidedigna, sendo que eu poderia representar da forma que eu acharia correto.
--	--

Fonte: A autora (2021).

Ao refletirmos sobre os níveis de iconicidade que emergiram durante a construção dos desenhos, identificamos as iconicidades lexical e diagramática na primeira versão do desenho de A1. Como uma representação, a aluna relaciona os termos “partículas” e “ondas”, utilizando a expressão “não daria pra diferenciar tanto” para ativar a ideia sobre o comportamento dos elétrons segundo a Mecânica Quântica. Na segunda versão do desenho, A1 discute que essa representação deve ser considerada como se tivesse dado um zoom na primeira, trazendo elementos que foram identificados no livro e que dialogaram com os conceitos estudados recentemente pela estudante. Além disso, A1 apresentou elementos que trouxeram animação para a ilustração, como o fato de os elétrons estarem sorrindo, justificando que após a leitura dos trechos do livro houve uma influência da criatividade ao reformular o desenho. Porém, a aluna comenta que se fosse ensinar para um aluno do Ensino Médio, ela usaria a sua primeira versão do desenho, pois ela considera como algo mais sério, embora o livro tenha a influenciado de uma forma lúdica, como podemos perceber no animismo da segunda versão do seu desenho. Com isso, devemos pensar que o animismo é algo que deve ter as suas ressalvas, pois pouco contribuiria em sala de aula, considerando que ele pode aparecer junto com o caráter lúdico, podendo este ser explorado. A escolha e organização dos termos usados demonstra iconicamente a intenção de comunicar uma ideia sobre o comportamento dos elétrons em um nível microscópico, nos fazendo pensar sobre uma relação entre as iconicidades lexical e diagramática.

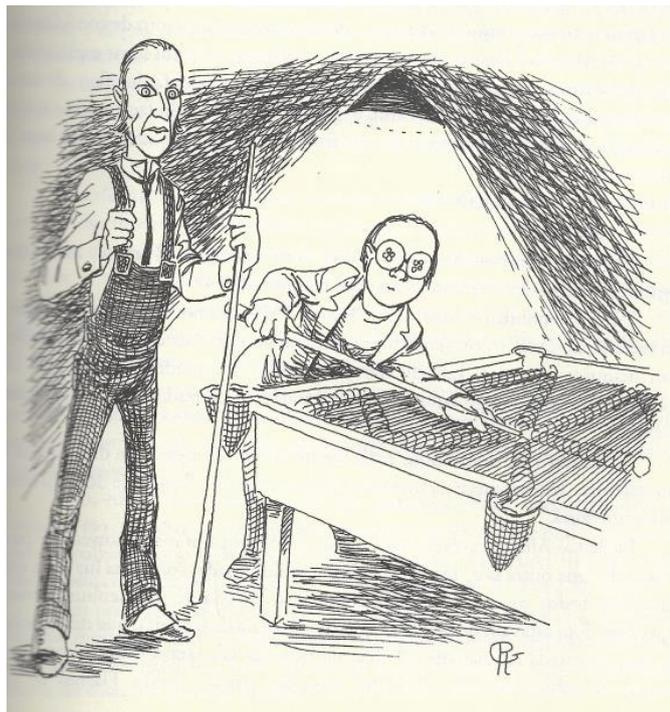
Para falar da sua primeira versão do desenho, A2 utilizou de palavras que deram subsídio para a sua representação do elétron, como “círculo pintado” e “carga”, segundo a ciência da Mecânica Clássica. A funcionalidade das palavras e da organização entre elas, indica um aparecimento concomitante das iconicidades lexical e diagramática. Na segunda versão do desenho, o estudante estrutura sua fala a partir da rememoração de aspectos de um desenho observado durante as discussões, citando palavras como “hidrogênio”, “orbital s” e

“plano nodal”, porém, o desenho é desenvolvido sobre a ideia de ser partícula e onda ao mesmo tempo, como é descrito por A2. A partir disso, podemos perceber a adequação da seleção das palavras e expressões para comunicar uma ideia de elétron diferente da ilustrada na primeira versão do desenho, apresentando uma iconicidade lexical.

Ainda no segundo momento síncrono, houve a discussão de alguns recortes da leitura realizada pelos participantes da oficina. A partir de alguns trechos, A1 e A2 verbalizaram algumas informações que consideramos interessantes para pensarmos sobre a ação da iconicidade presente no livro durante a realização da leitura.

Abaixo apresentamos a Figura 9, cuja, no livro, é acompanhada por um texto que discute sobre o encontro da personagem Alice, ao chegar no País do Quantum, com dois personagens que se trata do mecânico clássico e do mecânico quântico. No APÊNDICE D, apresentamos parte do texto que acompanha a referida figura.

Figura 9 – Ilustração do mecânico clássico e do mecânico quântico



Fonte: Gilmore (1998, p. 41).

No Quadro 4, incluímos as falas dos participantes A1 e A2 sobre a discussão do trecho que acompanhou a imagem acima.

Quadro 4 – Discussão do trecho envolvendo o mecânico clássico e o mecânico quântico

Fala de A1

(A1): No início, quando eu li... Eles estão juntos... A ciência, ela conversa sempre, que eles meio que não são inimigos. A Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica não são inimigas em si, mas têm pontos de vistas diferentes.
Fala de A2
(A2): A parte que fala dos óculos, que era difícil perceber para onde ele estava olhando, já dá a entender de algo que não é fixo, não é certo, eu imaginei isso, e associei ao elétron.

Fonte: A autora (2021).

Na fala dos participantes, nós podemos perceber que existe a presença de signos que acabam gerando outros signos, que estimulam a imaginação do leitor e suscitam na criação de imagens mentais, implicando na seleção de palavras que quando organizadas constroem a ideia manipulada pelos estudantes A1 e A2. Como, por exemplo, quando A1 comenta que os dois personagens estão conversando, nos fazendo pensar que, embora a ciência da Mecânica Quântica tenha promovido mudanças no conhecimento científico, ela pode manter diálogos com a ciência da Mecânica Clássica. No discurso de A2, percebemos que a ilustração dos óculos, que apresenta uma não-localidade no olhar do mecânico quântico, influencia o participante a pensar na incerteza da posição de algo que, logo em seguida, é associado ao elétron. Na fala dos dois estudantes, nós podemos perceber a presença de expressões que funcionam como ativadoras da mensagem presente no discurso, como a fala de que os mecânicos “não são inimigos”, pontuada por A1, e “algo que não é fixo”, declarada por A2, nos levando a pensar na iconicidade lexical.

5.1.3.1 Questionário 3

Para finalizar a oficina, foi disponibilizado um questionário no Google Classroom, ao final do segundo momento síncrono, contendo duas questões que envolveram os momentos vivenciados ao longo da oficina. No Quadro 5, apresentamos as perguntas e as respostas dadas pelos participantes A1 e A2.

Quadro 5 – Questionário 3

Perguntas e respostas – Questionário 3
1. Discorra sobre as relações e as dificuldades encontradas nos momentos de pensar na natureza do elétron a partir do desenvolvimento da Mecânica Quântica.

(A1): É difícil quebrar a ideia apresentada no ensino médio sobre o elétron ser uma partícula. Além disso representar sua capacidade dual também foi complicado, porque teria que mostrar que o elétron tem esse comportamento simultâneo.

(A2): As principais dificuldades estão atreladas a difícil aceitação, pois é necessário uma compreensão diferente do comum. Ademais, a natureza do elétron, divide concepções diferentes, e isso conseqüentemente implica numa maior dificuldade para consolidação de uma nova visão acerca da natureza do elétron.

2. Quais as possíveis relações podemos estabelecer entre as representações para o conceito de elétron e os trechos lidos da obra Alice no País do Quantum?

(A1): Existem diversas formas de relacionar o conceito de elétron com essa obra, por exemplo, no trecho que o mecânico quântico bombardeia as duas fendas para explicar que há o comportamento dual do elétron. Uma única partícula elétron passa pelas duas fendas quando se comporta como uma onda.

(A2): A partir dos textos lidos, foi possível associar alguns conceitos quânticos a acontecimentos da obra. Diante disso, um exemplo central, é o local em que a história da obra é contada, sendo possível fazer uma comparação a obra de Alice no país das maravilhas que inspirou a obra supracitada. Desta forma, as semelhanças estão justamente em que ambos os mundos não fazem muito sentido, seja o de Alice ou o quântico, sendo esse último, quando comparado ao mundo macroscópico, é difícil de ser compreendido.

Fonte: A autora (2021).

Analisando as falas da aluna A1, foi possível perceber, na primeira pergunta, o uso dos termos “capacidade dual” e “comportamento simultâneo”, que se apoiam no início da fala, para declarar a dificuldade de quebrar a ideia apresentada no Ensino Médio do elétron como uma partícula. O uso dos termos destacados carregam a ideia que a participante apresenta sobre a dificuldade de representar tais comportamentos. Vale destacar que essa interpretação é parte das interpretações dadas para a mecânica quântica – o elétron é onda e partícula ao mesmo tempo. Logo, a estrutura do discurso de A1 nos apresenta um diálogo entre as iconicidades lexical e diagramática, pois os léxicos usados para comunicar a ideia almejada conectam-se para demonstrar iconicamente o que a participante considera sobre as dificuldades em pensar na natureza do elétron. Na segunda pergunta, percebemos que A1 retoma uma parte do livro – momento em que o mecânico quântico realiza o experimento das

duas fendas – para relacionar o termo “comportamento dual” com a ideia de que o elétron como partícula acaba tendo comportamento de onda ao passar pelas fendas. Sabemos que isso acontece se ele não for observado. Com isso, a seleção dos léxicos, e a organização das ideias, corroboram para uma representação do conceito de elétron, que é comunicada através da interação entre as iconicidades lexical e diagramática e, neste caso, a partir da mediação do texto do livro.

Com relação às respostas de A2, na primeira pergunta, associada à dificuldade de pensar a natureza do elétron, o participante atrelou a necessidade de uma compreensão diferente do comum, destacando que tal natureza é dividida em concepções diferentes. Ao falar do que é diferente do comum, tal expressão comunica que existem dificuldades em compreender a natureza do elétron que, por sua vez, escapa do que é comumente conhecido. Por isso, percebemos a iconicidade lexical emergir a partir das marcas expressivas em relação ao conceito de elétron na fala do estudante, pois a expressão “difícil aceitação” estabelece uma conexão com a expressão “diferente do comum”, reforçando a mensagem que o estudante está comunicando. Quando o estudante fecha o raciocínio com “dificuldade para consolidação de uma nova visão acerca da natureza do elétron”, é como se fechasse um parêntese com o que foi dito sobre a “compreensão diferente do comum”, apresentando a iconicidade diagramática que nos guia pela mensagem da fala de A2.

Por fim, na segunda pergunta, o participante faz menção aos acontecimentos no País do Quantum, que pode ser comparado ao País das Maravilhas, onde acontecem coisas que não fazem muito sentido. Para terminar, A2 justifica que o mundo quântico é difícil de ser compreendido ao se comparar com o mundo macroscópico. Podemos perceber que há uma relação de conflito entre o que não faz sentido e aquilo que pode ser contemplado pelos nossos sentidos, que é o mundo macroscópico, apresentando, então, uma iconicidade lexical e diagramática através das expressões usadas e da intenção com que elas se organizam na fala do participante. Ainda assim, vale ressaltar os limites das analogias quando se trata do País do Quantum, pois, ao contrário do País das Maravilhas, ele é real.

5.2 MANIPULAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE SIGNOS ICÔNICOS E CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS: UMA SÍNTESE

Abaixo, apresentamos uma síntese – organizada em um quadro para cada participante – dos resultados analisados envolvendo os participantes A1 e A2.

PARTICIPANTE A1		
NÍVEL DE ICONICIDADE	MARCADOR	RELAÇÃO COM A APRENDIZAGEM SOBRE O ELÉTRON
PRIMEIRO MOMENTO SÍNCRONO – Questionário 1		
Lexical	“subpartículas” e “modelos atômicos”.	Para pensar nas partículas, a estudante parte de um modelo atômico (modelo de Thomson), cujo a este cientista atribui-se a descoberta do elétron.
Diagramática	“partículas carregadas negativamente encrustadas no átomo maciço”.	Uso de uma expressão para estabelecer uma conexão com a ideia de como são as subpartículas mencionadas, apresentando como elas são compreendidas em termos de sua localização no modelo mencionado.
Lexical	“comportamentos”, “discordância quanto a esses comportamentos” e “simultaneamente”.	As palavras selecionadas por A1 servem como suporte para expressar como as características da ciência da Mecânica Clássica e da Quântica são compreendidas pela participante.
Isotópica	“havia discordância quanto a esses comportamentos” e “estes comportamentos poderiam aparecer	As expressões usadas na fala apresentam uma trilha temática que conduz às ideias do conceito de onda e partícula na Mecânica

	simultaneamente”.	Clássica e na Mecânica Quântica.
Lexical	“efeito fotoelétrico”, “dualidade onda-partícula” e “experimentos da fenda”.	As expressões selecionadas por A1 carregam marcos importantes envolvendo a mudança da compreensão da natureza do elétron.
SEGUNDO MOMENTO SÍNCRONO – Os desenhos		
Lexical	“partículas”, “ondas” e “não daria para diferenciar tanto”.	Uso de expressões para apresentar uma ideia sobre o comportamento dos elétrons – o comportamento de onda e partícula se funde, não dando para diferenciar esses dois comportamentos –, frisando que essa seria a maneira que a participante apresentaria para seus alunos.
Diagramática	“como eu imaginaria que eu fosse representar ao meu aluno” e “um monte de partículas e um monte de ondas junto que não daria para diferenciar tanto”.	A conexão entre esses recortes da fala de A1 apresenta uma coerência em comunicar o que seria para ela uma representação do elétron, ao terminar a fala dizendo que um monte de partículas e ondas juntas não permitiria que as diferenciássemos.
Lexical	“zoom”, “eles são iguais”, “e um de cabeça	Os termos usados apresentam os elementos

	para baixo e o outro”, “aí eles se excitam”, “[...] o orbital, eu também quis representar que eles estão aí dentro” e “probabilidade”.	da ilustração, indicando que houve um zoom na imagem anterior, como se a participante agora pudesse imaginar os elétrons mais de perto, e características que não foram apresentadas no primeiro desenho.
Diagramática	“eu fiz o zoom” e “eu imaginei muita coisa, mas fui assim”.	A ordem com que a estudante descreve os aspectos se estrutura a partir dessas expressões, construindo a ideia apresentada sobre o comportamento dos elétrons em um nível microscópico.
A ilustração dos mecânicos no livro		
Lexical	“eles estão juntos”, “a ciência, ela conversa sempre” e “não são inimigos”.	A figura dos dois personagens dialogando exercem influência sobre a ideia da participante a respeito dos diálogos que acontecem no desenvolvimento da ciência, sobretudo em como a Mecânica Quântica pode dialogar com a Clássica, embora possuam configurações epistemológicas distintas.
Questionário 3		

Lexical	“partícula”, “capacidade dual” e “comportamento simultâneo”.	Utilização de palavras que possuem a função de evocar as dificuldades encontradas em pensar e representar a natureza do elétron.
Diagramática	“o elétron ser uma partícula” e “teria que mostrar que o elétron tem esse comportamento simultâneo”.	Ao falar da partícula elétron inicialmente, a conexão entre as ideias leva ao comportamento simultâneo do elétron que, no discurso, tem a funcionalidade de se diferenciar do comportamento de partícula, expressando quais são os aspectos que apresentam a dificuldade percebida pela participante.
Lexical	“o mecânico quântico bombardeia as duas fendas” e “comportamento dual”.	A estudante faz uso de uma parte do livro – momento em que o mecânico quântico realiza o experimento das duplas fendas – para apresentar o comportamento dual do elétron.
Diagramática	“no trecho que o mecânico quântico bombardeia as duas fendas” e “uma única partícula elétron passa	Através da mediação do livro, a participante conecta as expressões para organizar a ideia sobre o elétron apresentar

	pelas duas fendas quando se comporta como uma onda”.	comportamento de onda a partir do experimento citado.
--	--	---

Fonte: A autora (2021).

Quadro 7 – Síntese dos resultados do participante A2

PARTICIPANTE A2		
NÍVEL DE ICONICIDADE	MARCADOR	RELAÇÃO COM A APRENDIZAGEM SOBRE O ELÉTRON
PRIMEIRO MOMENTO SÍNCRONO – Questionário 1		
Lexical	“objetos muito pequenos” e “comportamentos definidos”.	Uso de expressões que comunicam as características dos objetos citados e os seus respectivos comportamentos.
Lexical	“visões opostas”, “quantum” e “comportamento de onda e partícula”.	Termos que convocam as ideias inerentes à diferenciação entre a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica.
Isotópica	“possuem vertentes diferentes, ou seja, visões opostas”, “quantum”, “Max Planck”, “elétron possuir comportamento de onda e partícula” e “na Mecânica Clássica ambos comportamentos eram bem diferentes”.	Palavras que servem como uma trilha para diferenciar o comportamento do elétron na Mecânica Clássica e na Mecânica Quântica.
Lexical	“afirmação de Broglie”, “difração de elétrons” e “apenas com partículas, e	O participante apresenta elementos na sua fala que dão suporte para a ideia

	não com corpos grandes”.	que quer ser comunicada: o fenômeno de difração de elétrons colocou em questão o comportamento de partículas, e isso não poderia ser relacionado aos corpos grandes.
SEGUNDO MOMENTO SÍNCRONO – Os desenhos		
Lexical	“círculo pintado” e “carga”.	As palavras escolhidas pelo participante apresentam aspectos da sua maneira de representar o elétron: um corpo redondo e sólido que é acompanhado de uma carga.
Diagramática	“eu fiz na perspectiva da Mecânica Clássica” e “um círculo pintado, aí tem a carga”.	Essas expressões podem servir como um parêntese, usado pelo participante para designar os aspectos da sua representação do elétron, que é embasada na Mecânica Clássica.
Lexical	“partícula e onda”.	O estudante introduz a palavra onda juntamente da palavra partícula, demonstrando a intenção de atribuir um movimento àquilo que estava parado no primeiro desenho.
A ilustração dos mecânicos no livro		
Lexical	“os óculos”, “era difícil perceber para onde ele	Os termos usados declaram a influência que os

	estava olhando”, “algo que não é fixo” e “elétron”.	aspectos da ilustração no livro tiveram sobre a ideia de pensar na incerteza associada à localização do elétron.
Questionário 3		
Lexical	“difícil aceitação”, “compreensão diferente do comum”, “natureza do elétron” e “concepções diferentes”.	O participante faz uso de palavras que possuem marcas expressivas a respeito do olhar para a natureza do elétron.
Diagramática	“as principais dificuldades” e “natureza do elétron”.	Essas expressões delimitam um marco no que concerne ao comportamento do elétron para o estudante, que é aquilo que se afasta do comum, e por isso é difícil de aceitar.
Lexical	“conceitos quânticos”, “país das maravilhas”, “semelhanças”, “os mundos não fazem muito sentido”, “mundo macroscópico” e “difícil de ser compreendido”.	As expressões usadas evocam uma ideia de estranheza aos conceitos quânticos quando presentes no País do Quantum, que apresenta semelhanças com o País das Maravilhas. Para o participante, quando os elementos desses mundos envolvendo os conceitos quânticos são direcionados para o mundo macroscópico, é difícil de

		ser compreendido.
Diagramática	“o local em que a história da obra é contada” e “quando comparado ao mundo macroscópico, é difícil de ser compreendido”.	O participante distribui os léxicos na sua fala a fim de colocar os conceitos quânticos entre o local em que a obra é contada e a narrativa que se afasta dos sentidos ligados ao mundo macroscópico, pontuando sobre a dificuldade em compreender.

Fonte: A autora (2021).

Ao longo da oficina, foi possível refletir sobre quais aspectos influenciaram os participantes a respeito da aprendizagem sobre o conceito elétron, e se mudanças na maneira de pensar sobre o elétron foram apresentadas com os passar dos momentos da oficina.

Durante o primeiro momento síncrono, percebeu-se que a participante A1 pensou o elétron a partir do modelo atômico de Thomson, e da recapitulação de experimentos que foram importantes para colocar em discussão o comportamento do elétron. Não obstante, esses experimentos fornecem uma base para pensar o comportamento simultâneo de partícula e onda pertencente ao elétron.

No segundo momento síncrono, a participante apresenta esse comportamento simultâneo na sua primeira versão do desenho, cuja é desenvolvida antes da realização da leitura dos trechos da obra Alice no País do Quantum. Na segunda versão do desenho, a participante afirma que houve influência da criatividade na hora de desenvolver essa versão, como se pode perceber quando ela fala sobre o zoom aplicado no desenho anterior, e quando há a descrição dos aspectos da ilustração. Nesse momento, podemos pensar que os elementos da narrativa da obra podem ter influenciado a participante a imaginar os elétrons com vida (presença de um animismo), se comportando em um nível microscópico. Também é válido pensar que a construção da narrativa sobre uma realidade que parece impossível – o País do Quantum – possibilitou usar a imaginação nos âmbitos que também parecem impossíveis no mundo macroscópico, como o nível em que partículas e ondas apresentam diálogo entre seus comportamentos. Na discussão sobre a ilustração dos mecânicos clássico e quântico, percebemos que a narrativa da conversa entre os dois personagens contribuiu para a

participante pensar sobre o desenvolvimento da ciência, considerando que os elementos da ilustração se tornaram outros para a participante, quando ela relaciona as possibilidades de a Mecânica Quântica dialogar com a Clássica.

No fechamento da oficina, A1 declara sobre a dificuldade em representar o comportamento de partícula e onda para o elétron. Como possibilidade de relacionar a representação para o conceito de elétron com os trechos lidos da obra *Alice no País do Quantum*, a participante destaca o experimento das duplas fendas com elétrons, realizado pelo mecânico quântico, o que possibilita pensar sobre a figura do mecânico quântico representar o olhar que atribui ao experimento a função de questionar o comportamento do elétron, que antes era entendido apenas como partícula.

Durante o primeiro momento síncrono, A2 fala do elétron a partir de características que, para ele, são inerentes ao elétron: objeto muito pequeno com comportamento definido. Logo em seguida, o participante fala que essas características se associam à Mecânica Clássica, e que esta se diferencia da Mecânica Quântica. Para pensar sobre a ciência Quântica, A2 associa termos como “quantum” e “comportamento de onda e partícula. Considerando que o desenvolvimento da Mecânica Quântica apresentou evidências que colocaram em pauta a compreensão da natureza do elétron, o participante, para pensar sobre as mudanças em termos da natureza do elétron, cita a contribuição do cientista De Broglie e o fenômeno de difração de elétrons, cujos estabeleceram conflitos em termos de algo que era entendido como partícula apresentar também comportamento de onda. As ideias pontuadas são delimitadas pelo participante apenas aos corpos minúsculos como partículas, excluindo o que ele chama de corpos grandes.

No segundo momento síncrono, o participante apresenta sua primeira versão do desenho com um aspecto mencionado no primeiro momento síncrono: possui um comportamento definido. Isso é ilustrado no corpo redondo pintado, ao qual também se atribui uma carga. Essa primeira versão do desenho é entendida sob as explicações da Mecânica Clássica. Na segunda versão do desenho, A2 tenta atribuir ao círculo pintado a característica de se propagar no espaço como uma onda. Considerando que essa versão foi desenvolvida após a leitura dos trechos de *Alice no País do Quantum*, pensamos na influência das ideias do livro quando apresentam os elétrons em movimento – em determinados momentos se sabe onde o elétron está, e em outros não. No momento de discussão envolvendo a ilustração dos mecânicos clássico e quântico, percebemos que esta evocou no participante uma ideia que partiu do detalhe dos óculos do mecânico quântico, pois serviu de ponto de partida para A2 refletir sobre a incerteza associada à localização do elétron.

Com o questionário de encerramento da oficina, o participante discorre sobre a dificuldade em aceitar a natureza do elétron por ela ser diferente do que é comum. A partir da obra, A2 pontua sobre as estranhezas encontradas no local onde acontece a narrativa, ligando aos conceitos quânticos e à dificuldade em compreendê-los, uma vez que há obstáculos ao fazer comparações com o mundo macroscópico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estamos em um solo de conceitos abstratos quando falamos da ciência Química e das suas áreas de estudo. Pensando na aprendizagem desses conceitos, também pensamos nas ferramentas usadas nesse processo. A linguagem é uma ferramenta, quando palavras são selecionadas para se adequar àquilo que se pretende descrever, e que escapa da realidade imediata. Nesse âmbito, os indivíduos fazem uso de representações, cujas partem de uma base e se estruturam para alcançar aquilo a que se deseja aproximar. A maneira como essa base é utilizada sofre influência das experiências do indivíduo, ou seja, um mesmo conjunto de representações pode construir imagens mentais diferentes em cada indivíduo. Aqui, cabe pensar sobre os textos de ficção com fins didáticos, uma vez que o conteúdo é trabalhado através das notas explicativas mencionadas anteriormente, e fornecem representações que podem não estar explícitas, que acabam sendo manipuladas pelo indivíduo, cujo as transforma em outras formas de dizer aquilo que estava implícito.

Ao longo da intervenção didática realizada, os alunos de um curso de Licenciatura em Química dialogaram sobre o conceito de elétron mediante o desenvolvimento da Mecânica Quântica, e apresentaram elementos indicativos sobre seus respectivos processos de construção de significados sobre esse conceito.

Os participantes da intervenção apresentaram o que chamamos de marcadores em seus discursos, através dos quais analisamos a manipulação dos diferentes tipos de signos icônicos (semelhanças) para a construção de significados sobre o conceito de elétron, nos apoiando na Teoria da Iconicidade Verbal. Através dessa mesma teoria, identificamos os níveis de iconicidade presentes na obra *Alice no País do Quantum*, cujos também foram manipulados pelos estudantes. A partir do problema de pesquisa construído para esse trabalho, percebemos que o papel da iconicidade textual, presente na obra selecionada, possibilitou uma maior exploração da imaginação no discurso ficcional, fazendo uso de elementos – que emergiram de um jogo de metáforas – para a estruturação de um discurso na construção de significados sobre o conceito de elétron segundo a Mecânica Quântica.

Os primeiros marcadores identificados nos discursos dos estudantes mostraram as concepções primeiras sobre o conceito de elétron, as quais se relacionaram com a trajetória dos participantes e com as discussões realizadas no primeiro encontro síncrono da oficina. Os marcadores apresentados após a leitura dos trechos do livro mostraram uma influência da estrutura do texto, que foi a capacidade de usar as faculdades imaginativas para transformar cenas do livro em fenômenos que fazem parte da natureza do elétron. Quando comparamos a

manipulação da iconicidade presente na obra entre os dois participantes, percebemos que para a participante que já havia cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica os aspectos estruturais da obra puderam ser mais explorados, sobretudo durante a reformulação do desenho.

Quando se discutiu, no segundo encontro síncrono da oficina, os trechos que foram lidos, percebeu-se que a narrativa ficcional presente na obra influenciou na formação de imagens mentais icônicas nos participantes, cujas foram externalizadas através de vocábulos selecionados. Os recortes da obra funcionaram como instrumento para os participantes refletirem sobre a natureza do elétron e as suas implicações entorno dela, como quando uma participante pensa nas possibilidades de diálogo entre a ciência clássica e quântica, e quando um participante reflete a respeito do Princípio da Incerteza associado ao elétron.

Não obstante, a dificuldade em representar a dualidade onda-partícula associada ao elétron foi pontuada pelos dois participantes analisados. Essa dificuldade também foi associada às experiências anteriores ao Ensino Superior, uma vez que o elétron, comumente, é apresentado apenas como partícula. Não podemos deixar de considerar que essa dificuldade também se associa aos cientistas, considerando uma preocupação em pensar sobre as nuances desses assuntos, e não apenas uma operacionalização deles.

A realização da intervenção didática por meio de uma oficina possibilitou um melhor acompanhamento dos participantes, e um melhor aproveitamento das discussões realizadas, que foram a fonte dos dados para essa pesquisa. Não podemos deixar de mencionar a interferência da realidade pandêmica, que nos pôs a realizar a oficina de maneira remota, no entanto, não acreditamos que isso tenha comprometido a qualidade das atividades. Selecionar estudantes de um curso de Licenciatura em Química que já havia cursado a disciplina de Introdução à Química Quântica, e que não havia cursado ainda, também foi importante para refletir sobre como cada etapa da oficina pôde ser aproveitada pelos participantes.

Diante dos dados obtidos, recomendamos, para futuras pesquisas, reflexões a respeito dos conhecimentos construídos sobre a natureza do elétron antes de ingressar no Ensino Superior, e como isso pode influenciar nos anos iniciais de aprendizagem em um curso de Licenciatura em Química.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. L. de. O nascimento da mecânica quântica. **Revista UNINGÁ**, n. 4, p. 145-151, abr./jun. 2005. Disponível em: <http://revista.uninga.br/index.php/uninga/article/download/391/57/>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- ALMEIDA, W. B. de.; SANTOS, H. F. dos. Modelos teóricos para a compreensão da estrutura da matéria. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola**, n. 4, p. 6-13, mai. 2001. Disponível: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/04/mod-teor.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- ATKINS, P.; PAULA, J. De. Teoria quântica: introdução e princípios. *In*: ATKINS, P.; PAULA, J. De. **Físico-Química**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012, cap. 7, p. 211-237. Disponível em: <https://archive.org/details/9788521621041/page/n37/mode/2up>. Acesso: 23 abr. 2021.
- BASTOS FILHO, J. B. Os problemas epistemológicos da realidade, da compreensibilidade e da causalidade na teoria quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, jun. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v25n2/a02v25n2>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- BRAGA, J. P. O colapso da equipartição da energia. **Química Nova**, v. 24, n. 5, p. 693-699, 2001. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422001000500018&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 23 abr. 2021.
- BRUNER, J. S. Introdução. *In*: VIGOTSKI, L. S. **Pensamento e linguagem**. 4. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2008.
- CHAYUT, M. J. J. Thomson: The discovery of the electron and the chemists. **Annals of Science**, p. 527-544, 2006. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00033799100200431>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- D. MELO, P. de.; V. MELO, P. de. **Uma introdução à semiótica peirceana**. Paraná: Unicentro, [2015]. p. 9-24. Disponível em: <http://repositorio.unicentro.br:8080/jspui/bitstream/123456789/953/5/Uma%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0%20semi%C3%B3tica%20peirceana.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- FERREIRA, J. C. D. Ciência, ficção científica e ensino de ciências. *In*: FERREIRA, J. C. D. **Ficção científica e ensino de ciências: seus entremeios**. 2016. Tese (Doutorado em Educação) – Setor de Educação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. p. 19-55. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/43213>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- FERREIRA, J. C. D. Discurso científico, discurso ficcional e discurso pedagógico. *In*: FERREIRA, J. C. D. **Ficção científica e ensino de ciências: seus entremeios**. 2016. Tese (Doutorado em Educação) – Setor de Educação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. p. 75-93. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/43213>. Acesso em: 23 abr. 2021.

- FRANCO, M. L. P. B. **Análise de conteúdo**. 2. ed. Brasília: Liber Livro, 2005. p. 7-17. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/24812649/analise-de-conteudo-maria-laura-franco>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. p. 43-55. Disponível em: http://www.uece.br/nucleodelinguasitaperi/dmdocuments/gil_como_elaborar_projeto_de_pesquisa.pdf. Acesso em: 23 abr. 2021.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. p. 1-59. Disponível em: <https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9cnicas-de-pesquisa-social.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- GILMORE, R. **Alice no país do quantum: A física quântica ao alcance de todos**. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.
- GOMES, E. F.; AMARAL, S. C. M. do.; PIASSI, L. P. de C. A máquina do tempo de H. G. Wells: uma possibilidade de interface entre ciência e literatura no ensino de física. **REMPEC – Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 3, n. 2, p. 144-154, ago. 2010. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/ensinosaudeambiente/article/view/21119>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quase-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n2/a19v33n2.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- GOMES, H. S. P.; OLIVEIRA, O. B. De. Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomo. **Ciências & Cognição**, v. 12, p. 96-109, dez. 2007. Disponível em: http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-58212007000300010. Acesso em: 28 jun. 2021.
- HEISENBERG, W. O conceito de “compreensão” na física moderna. *In*: HEISENBERG, W. **A parte e o todo: Encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política**. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996. p. 39-56.
- I. SILVA; FREIRE JÚNIOR, O.; A. SILVA, P. B. da. O modelo do grande elétron: o background clássico do efeito Compton. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172011000400019&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 23 abr. 2021.
- JORGE, A. M. G. O que é um signo? (1894). **FACOM**, n. 18, 2007. Disponível em: http://www.faap.br/revista_faap/revista_facom/facom_18/ana.pdf. Acesso em: 23 abr. 2021.
- KRAGH, H. J. J. Thomson, the electron, and the atomic architecture. **The Physics Teacher**, v. 35, p. 328-332, set. 1997. Disponível em: <https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.2344712?journalCode=pte>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- LEITE, A.; SIMON, S. Werner Heisenberg e a Interpretação de Copenhague: a filosofia platônica e a consolidação da teoria quântica. **Scientiae Studia**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 213-

241, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-31662010000200004. Acesso em: 23 abr. 2021.

LIMA, L. G. de.; RICARDO, E. C. Física e literatura: uma revisão bibliográfica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 32, n. 3, p. 577-617, dez. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2015v32n3p577>. Acesso em: 23 abr. 2021.

LINSINGEN, L. von. A literatura, a educação e o ensino de ciências. *In*: LINSINGEN, L. von. **Literatura infantil no ensino de ciências**: articulações a partir da análise de uma coleção de livros. 2008. Tese (Mestrado em Educação Científica e Tecnológica) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. p. 15-59. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91784>. Acesso em: 23 abr. 2021.

LOPES, C. V. M. A proposta de J. J. Thomson. *In*: LOPES, C. V. M. **Modelos atômicos no início do século XX**: da física clássica à introdução da teoria quântica. 2009. 173 p. Tese (Doutorado em História da Ciência) – Pontifícia Universidade Católica, São Paulo, 2009, p. 21-45. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/78156>. Acesso em: 23 abr. 2021.

MAHAN, B. M.; MYERS, R. J. A estrutura eletrônica dos átomos. *In*: MAHAN, B. M.; MYERS, R. J. **Química**: um curso universitário. 4. ed. São Paulo: Blucher, 1995. cap. 10, p. 266-303.

MARTINS, W. A. Semiótica de Charles Peirce: o ícone e a primeiridade. **Revista Contemplação**, v. 12, p. 237-250, 2015. Disponível em: <http://fajopa.com/contemplacao/index.php/contemplacao/article/viewFile/93/95>. Acesso em: 23 abr. 2021.

MOKROSS, B. J. Não-Localidade na Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 19, n. 1, p. 136-151, mar. 1997. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v19_136.pdf. Acesso em: 23 abr. 2021.

NAVARRO, J. **A history of the electron**: J. J. and G. P. Thomson. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 1-113. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274750871_Review_of_Jaume_Navarro_A_History_of_the_Electron_J_J_and_G_P_Thomson_Cambridge_Cambridge_University_Press_2012. Acesso em: 23 abr. 2021.

NOVAES, M.; STUDART, N. Densidade de probabilidades quânticas. *In*: NOVAES, M.; STUDART, N. **Mecânica Quântica Básica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016. cap. 2, p. 25-41. Disponível em: http://www1.fisica.org.br/mnpef/sites/default/files/anexospagina/Mecanica_quantica_basica_Novaes-Studart.pdf. Acesso em: 23 abr. 2021.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 2, p. 193-203, 2005. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172005000200003. Acesso em: 23 abr. 2021.

PANTOJA, G. C. F.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009. **R. E. B. C. T.**, v. 4, n. 3, p. 1-29, set./dez. 2011. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/976>. Acesso em: 27 jun. 2021.

PAULO, I. J. C. de.; MOREIRA, M. A. O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. **Ciência e Educação**, v. 17, n. 2, p. 421-434, 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132011000200011#:~:text=O%20problema%20da%20verbaliza%C3%A7%C3%A3o%20o%20u,palavra%20ou%20frase%20mal%20colocada. Acesso em: 23 abr. 2021.

PESSOA, F. **Livro do Desassossego** / Bernardo Soares. Novo Hamburgo: Clube de Literatura Clássica, 2021. p. 133-136.

PIASSI, L. P.; PIETROCOLA, M. Ficção científica e ensino de ciências: para além do método de ‘encontrar erros em filmes’. **Educação e Pesquisa**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 525-540, set./dez. 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-97022009000300008&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 23 abr. 2021.

PIZA, A. F. R. de T. Mecânica quântica: uma nova imagem do mundo. **Ciência Hoje**, v. 36, n. 213, p. 40-48, mar. 2005. Disponível em: https://www.fisica.net/mecanica-quantica/mecanica_quantica_uma_nova_imagem_do_mundo.pdf. Acesso em: 23 abr. 2021.

PRIGOGINE, I. Nosso diálogo com a natureza. *In*: PRIGOGINE, I. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2011. p. 161-171.

RODRIGO SIQUEIRA-BATISTA; ROMULO SIQUEIRA-BATISTA; HELAYEL-NETO, J. A. A realidade quântica: novas histórias e apontamentos epistemológicos. **Revista Physicae**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, 2003. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/physicae/article/view/13467>. Acesso em: 23 abr. 2021.

SEQUEIRA, L. K. de.; TEIXEIRA, N. C. R. B. Alice no país dos signos: releitura semiótica. **Temática**, n. 12, p. 117-127, dez. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/tematica/article/view/27038/14378>. Acesso em: 19 dez. 2021.

SILVA, L. C. M. da.; SANTOS, W. M. S.; DIAS, P. M. C. A carga específica do elétron. Um enfoque histórico e experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 2011. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/331601.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2021.

SILVA, V. C. da. A filosofia da ciência da mecânica quântica e a desconstrução da ontologia materialista. **Cadernos do PET Filosofia**, v. 1, n. 2, p. 30-43, 2010. Disponível em: <https://ojs.ufpi.br/index.php/pet/article/view/518>. Acesso em: 23 abr. 2021.

SIMÕES, D. **Iconicidade Verbal**. Teoria e Prática. Rio de Janeiro: Dialogarts, 2009a. p. 39-102.

WARTHA, E. J.; REZENDE, D. de B. Os níveis de representação no ensino de química e as categorias da semiótica de Peirce. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, p. 275-290, 2011. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/230/162>. Acesso em: 22 abr. 2021.

APÊNDICE A – PRIMEIRO MOMENTO SÍNCRONO E ASSÍNCRONO DA OFICINA

IDENTIFICAÇÃO		
Disciplina	Professor(a)	E-mail
OFICINA SOBRE O CONCEITO DE ELÉTRON E A MECÂNICA QUÂNTICA		

Conteúdo:	A natureza do elétron e suas propriedades
Data:	

PLANO DE AULA SÍNCRONA

OBJETIVO GERAL
Explorar o conteúdo vigente, a fim de estabelecer relações com o desenvolvimento da mecânica quântica e a compreensão do conceito de elétron.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS
1- Diferenciar mecânica quântica de mecânica clássica; 2- Relacionar as propriedades do elétron com o desenvolvimento da mecânica quântica; 3- Estabelecer relações entre a definição de elétron e as suas propriedades;

METODOLOGIA PARA O ENCONTRO SÍNCRONO (2H)		RECURSOS
Atividade	Tempo	
Sondagem a respeito do que os estudantes já sabem sobre o conteúdo a ser abordado. Faremos uso de vídeos para motivar o debate.	30 minutos	Vídeo Mecânica Quântica – Parte 1: Crash Course Física #43 https://www.youtube.com/watch?v=7kb1VT0J3DE Vídeo Mecânica Quântica - Parte 2: Crash Course Física #44 https://www.youtube.com/watch?v=qO_W70VegbQ

Exposição dialogada do conteúdo, tendo como base o vídeo apresentado.	30 minutos	Apresentação em slides
Realização de atividade envolvendo questões (questionário no Google Forms) + formulação da primeira versão do desenho do elétron	1 hora	Google Forms
METODOLOGIA PARA O ENCONTRO ASSÍNCRONO	RECURSOS	
Leitura de trechos do livro de Alice no País do Quantum	Trechos escaneados do livro postados no Google Classroom	
Reformulação do desenho feito anteriormente para ser postado no Google Classroom	Google Classroom	
PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO		
Observar como os estudantes compreendem o conceito de elétron dentro das discussões do desenvolvimento da mecânica quântica, e como isso acontece, a partir do processo de semiose, antes e durante a realização da atividade com experimentação de desenho.		

APÊNDICE B – SEGUNDO MOMENTO SÍNCRONO DA OFICINA

IDENTIFICAÇÃO		
Disciplina	Professor(a)	E-mail
OFICINA SOBRE O CONCEITO DE ELÉTRON E A MECÂNICA QUÂNTICA		

Conteúdo:	A natureza do elétron e suas propriedades
Data:	

PLANO DE AULA SÍNCRONA

OBJETIVO GERAL
Explorar como as discussões envolvendo o desenvolvimento da mecânica quântica, e as metáforas do livro Alice no País do <i>Quantum</i> , influenciam na compreensão da natureza da partícula elétron ilustrada no desenho.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS
1- Diferenciar os aspectos considerados para a construção dos dois desenhos; 2- Analisar como a natureza do elétron se apresenta nos desenhos; 3- Relacionar as metáforas do livro com o desenho reformulado.

METODOLOGIA PARA O ENCONTRO SÍNCRONO (2H)		RECURSOS
Atividade	Tempo	
Discussão sobre os aspectos considerados nos momentos de construção do primeiro desenho e, posteriormente, de sua reformulação.	30 minutos	-
Exposição dialogada sobre o que foi abordado nos primeiros momentos da oficina, fazendo relação com os trechos selecionados do livro.	30 minutos	Apresentação em slides
Atividade escrita: solicitar	1 hora	

que os participantes discorram sobre as relações e as dificuldades que encontraram nos momentos de pensar na natureza do elétron a partir do desenvolvimento da mecânica quântica e nos trechos do livro.		Google Classroom
---	--	------------------

PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO

Observar como e quais signos são manipulados na construção do desenho do elétron e na reformulação dele.

APÊNDICE C – FALAS DOS DOIS PARTICIPANTES COM A PRESENÇA DOS NÍVEIS DE ICONICIDADE

Perguntas e respostas – Questionário 1
<p>1. Como o conhecimento da Mecânica Clássica poderia descrever o comportamento de partículas? Justifique sua resposta.</p>
<p>(A1): Através dos modelos atômicos baseados em subpartículas como no caso do modelo de Thompson, porque este modelo é proposto como sendo que o átomo composto por partículas carregadas negativamente encrustadas no átomo maciço.</p> <p>(A2): Acredito, que objetos muito pequenos impossíveis de serem enxergados com o olho humano. Além disso, essas partículas possuíam comportamentos definidos.</p>
<p>2. De que modo poderíamos delimitar uma fronteira entre os mundos “quântico” e “clássico”? Explique.</p>
<p>(A1): A partir do experimento de Einstein que mostra o efeito fotoelétrico, no qual, ele observa elétrons sendo ejetados do metal quando incide radiação. Além disso, a falta de explicação para a absorção total de radiação do corpo negro.</p> <p>(A2): No mundo clássico, os conhecimentos e ideias eram voltadas a afirmações "simples" quando comparadas ao mundo "quântico", no que tange conteúdos microscópicos.</p>
<p>3. Assim como a Mecânica Clássica, a Mecânica Quântica também pode fazer previsões? Que tipo de previsões? Explique.</p>
<p>(A1): Pode-se prever a região de maior probabilidade que encontra-se um elétron, baseado na função de onda de Schroedinger. Além disso, pode-se prever com um maior grau de certeza a velocidade do elétron, por exemplo, ou sua posição, isso de acordo com Heisenberg.</p> <p>(A2): Sim, radiações do corpo Negro, em que o aumento da temperatura ocasiona o deslocamento do máximo de comprimento de onda.</p>
<p>4. O conceito de onda e partícula fazem parte da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica? Justifique.</p>
<p>(A1): Sim, na mecânica clássica houveram experimentos que mostraram estes dois comportamentos, no entanto, haviam discordância quanto a esses comportamentos. Na mecânica quântica, foi proposto que estes comportamento poderiam aparecer simultaneamente e que experimento poderia favorecer o aparecimento de um destes comportamentos.</p> <p>(A2): Sim. No entanto, possuem vertentes diferentes, ou seja, visões opostas. Na mecânica quântica, a partir da denominação quantum proposta por Max Planck, e as descobertas</p>

subsequentes, foi atestado a possibilidade do elétron possuir comportamento de onda e partícula, e na mecânica clássica ambos comportamentos eram bem diferentes.
5. O que significa o comportamento de uma partícula e de uma onda? Descreva com suas palavras.
(A1): O comportamento de partícula seria um corpo que possui massa e ocupa um espaço. Já o de onda seria uma propagação com amplitude, comprimento e frequência que ao interagir com outra pode ser construtiva ou destrutiva. (A2): O comportamento de partícula, de forma ampla, poder ser descrito como "algo" que possui uma massa definida. Já a Onda são perturbações contínuas sobre a matéria "carregando" energia.
6. Como o Princípio da Incerteza, de Heisenberg, pode ser usado para diferenciar a Mecânica Clássica da Mecânica Quântica?
(A1): Na mecânica clássica, através do conteúdo de movimento retilíneo uniforme, por exemplo, podemos exatamente encontrar a velocidade e posição. Em contrapartida, na quântica, em corpos microscópicos não se pode ter a certeza de ambas simultaneamente. Isto é, de acordo com Princípio da Incerteza de Heisenberg, se eu tiver um menor grau de incerteza na posição eu terei um maior grau de incerteza na velocidade e vice-versa. (A2): A partir da ideia principal, de que não é possível identificar com precisão a localização do elétron.
7. Como a compreensão da natureza do elétron pode se relacionar com o desenvolvimento da Mecânica Quântica?
(A1): Por meio do experimento do efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula e dos experimento da fenda. (A2): Acredito, que com a afirmação de Broglie a respeito da difração dos elétrons, que pode ser considerada apenas com partículas, e não com corpos grandes.

**APÊNDICE D – RECORTE DO TEXTO QUE ACOMPANHOU A
ILUSTRAÇÃO DO MECÂNICO CLÁSSICO E DO MECÂNICO
QUÂNTICO**

O Instituto de Mecânica

3

Alice examinou o prédio que estava à sua frente. Era uma modesta estrutura de tijolos, já meio castigada pelo tempo. Na frente, havia um cartaz que dizia se tratar do “Instituto de Mecânica”. Ao lado do cartaz havia uma porta, em que alguém tinha pregado um aviso: “Não bata. Apenas entre.” Alice experimentou e viu que a porta não estava trancada. Abriu-a e entrou.

Do outro lado da porta havia uma sala ampla e escura. No meio da sala havia uma área iluminada e clara. Dentro desta limitada região era possível distinguir alguma coisa com razoável nitidez. Mais para além, jazia uma extensão aparentemente ilimitada de escuridão na qual nada significativo podia ser discernido. Na mancha de luz ela viu uma mesa de bilhar com duas figuras se movendo em volta. Alice andou em sua direção e quando se aproximou, *eles se voltaram para olhar para ela. Era uma dupla bem estranha. Um era alto e angular e usava uma camisa branca engomada com colarinho duro e também alto, uma gravata estreita e, para surpresa de Alice, um macacão. Seu rosto era aquilino, e ele tinha costeletas fartas. Ele olhou para ela com tanta intensidade que Alice sentiu que ele podia perceber até mesmo o menor detalhe naquilo que observava. Seu companheiro era menor e mais jovem. Seu rosto redondo era decorado com uns óculos grandes, de armação de metal; era difícil perceber para onde ele estava olhando, ou mesmo onde exatamente estavam seus olhos. Ele vestia um avental branco de laboratório sob o qual aparecia uma camiseta com o desenho de algo vagamente atômico na frente.* Não era fácil dizer com certeza o que era, pois as cores estavam desbotadas.

“Com licença, este é o Instituto de Mecânica?” Alice perguntou, mais para puxar conversa. Pelo cartaz, ela já sabia que era.

“Sim, minha cara”, disse o mais alto e impressionante dos dois. “Eu sou um Mecânico Clássico do Mundo Clássico, e estou visitando meu colega, aqui, que é um Mecânico Quântico. Qualquer que seja seu problema, tenho certeza de que um de nós poderá ajudá-la. É só esperar até que terminemos nossas jogadas.”

Ambos se viraram para a mesa de bilhar. O Mecânico Clássico mirou com cuidado, considerando as ínfimas partes de todos os ângulos envolvidos. Finalmente, deu a tacada bem à vontade. A bola bateu e voltou numa impressionante