



O CONCEITO DE ELÉTRON E A NARRATIVA DE ALICE NO PAÍS NO QUANTUM: UMA CONSTRUÇÃO DE SIGNIFICADOS PELA ICONICIDADE DE SIGNOS

The electron concept and the narrative of Alice in Quantumland: building meanings through iconicity of signs

Marília dos Santos Marinho [marinhomari50@gmail.com]

*Núcleo de Formação Docente
Universidade Federal de Pernambuco
Avenida Marielle Franco, s/n, Caruaru, Pernambuco, Brasil*

João Roberto Ratis Tenório da Silva [joaoratistenorio@gmail.com]

*Departamento de Química
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Recife, Pernambuco, Brasil*

Resumo

A relação Ciência-Literatura, na Educação Científica, tem apontado às potencialidades educativas da literatura fantástica, por exemplo, para a aprendizagem de conceitos abstratos. No entanto, não se tem explorado o papel dos elementos ficcionais no processo de aprendizagem e como eles são retomados em situações de ensino. Neste estudo, realizamos uma oficina sobre o conceito de elétron e a Mecânica Quântica com estudantes de um curso de licenciatura em Química, para investigar como a narrativa de Alice no País do Quantum poderia influenciar na aprendizagem. Ao analisar os dados das discussões e questionários, a partir da Teoria da Iconicidade Verbal (TIV), identificamos a manipulação de níveis de iconicidade pelos estudantes ao relacionarem elementos ficcionais com suas compreensões sobre o elétron em uma realidade microscópica. Nossos achados apontam como a narrativa do livro foi importante na (re)significação por parte dos estudantes, sendo representada pela manipulação dos níveis de iconicidade propostos pela TIV.

Palavras-Chave: Conceito de elétron; Literatura fantástica; Teoria da Iconicidade Verbal.

Abstract

The Science-Literature relationship in Science Education has been pointing to the educational potential of fantastic literature, for instance, for learning abstract concepts. However, the role of fictional elements in the learning process and how they are incorporated into teaching situations has not been thoroughly explored. In this study, we conducted a workshop on the concept of the electron and Quantum Mechanics with students in a Chemistry teaching program to investigate how the narrative of Alice in the Quantumland could influence learning. By analyzing the data from discussions and questionnaires using the Theory of Verbal Iconicity (TIV), we identified the manipulation of iconicity levels by students as they related fictional elements to their understandings of the electron in a microscopic reality. Our findings indicate how the narrative of the book was significant in the students' (re)signification, represented by the manipulation of iconicity levels proposed by TIV.

Keywords: Electron concept; Fantastic literature; Verbal Iconicity Theory.

INTRODUÇÃO

Na Educação Científica, os conceitos pertencem a uma linguagem que orienta um corpo de conhecimento, no qual estão presentes fórmulas, teorias, modelos, leis, axiomas etc. A abstração em torno desses aspectos pode estar presente quando nos direcionamos a compreender o mundo a partir do olhar de

algumas áreas de estudo, como a Mecânica Quântica (MQ). Neste caso específico, o estabelecimento de uma linguagem direcionada a um modelo probabilístico, que se distancia do nosso cotidiano, é um desafio para o(a) professor(a) em sala de aula (Paulo & Moreira, 2011).

Em 1959, Charles Percy Snow proferiu uma palestra, na Universidade de Cambridge, propondo uma aproximação entre o que ele chamou de “*duas culturas*”. Para o autor, uma compreensão mais aprofundada do mundo só seria possível pela interrelação entre o mundo das ciências e o das humanidades, proporcionando que as questões psicológicas, sociais e éticas não fossem esquecidas pela ciência, bem como os conceitos básicos da ciência não fossem esquecidos pelas humanidades. Snow acreditava que um distanciamento entre essas áreas do conhecimento resultaria em consequências à educação (Snow, 1995).

No Ensino de Ciências, a interface Ciência-Literatura tem sido um aporte teórico para investigar sobre como estudantes atribuem significados a conceitos que possuem certos níveis de abstração. Alguns trabalhos têm observado como conteúdos científicos nas histórias da literatura infantil, por exemplo, podem ser contextualizados no sentido de problematizar concepções de Ciência (Groto & Martins, 2015). Além disso, reflexões têm sido proporcionadas sobre o caráter abstrato de conceitos científicos da Física Quântica, através da manipulação de analogias, metáforas e representações semióticas na literatura infanto-juvenil (Souza & Neves, 2016; Lima & Ricardo, 2019). Obras literárias têm indicado potencialidades educativas pelas formas de pensar os conteúdos científicos em linguagens literárias (Piassi, 2015) e, em destaque, a literatura fantástica apresenta potencial nas suas narrativas para refletir a realidade dos fenômenos da Física (Ramos & Piassi, 2017). No entanto, esses trabalhos têm explorado poucos aspectos em termos de como a aprendizagem acontece a partir dos elementos ficcionais ao abordar os conceitos científicos.

Com base na Psicologia Cultural Semiótica (PCS) (Valsiner, 2012, 2014), a aprendizagem é um processo dinâmico de construção de significados mediados por signos. Como seres ativos no mundo, os indivíduos são sistemas funcionando culturalmente – a cultura faz parte do meio e das funções psicológicas humanas. Esse funcionamento se dá por processos de internalização e externalização, desenvolvidos por assimilações do mundo exterior a partir dos materiais semióticos disponíveis para o indivíduo, e da construção de novas sínteses do que já está internalizado. Processos de externalização e internalização se retroalimentam para a construção de novos signos e significados (Valsiner, 2012).

Os signos medeiam as nossas interações com o mundo e são produtos dessas interações, conforme estabelecem relações de troca com objetos concretos ou conceitos abstratos referentes (Valsiner, 2012; Simões, 2009). Ao se apresentarem como complexos de signos, têm função do tipo ícone (semelhança com o objeto a que se refere); índice (indicação com o que se associa); e símbolo (convenção estabelecida em um contexto) (Peirce, 1894). Pela natureza da iconicidade como propriedade dos signos, nós consideramos a sua potencialidade como função primária nas construções de significados, por ascender à mente signos icônicos (imagens mentais) dos objetos no mundo.

Segundo a Teoria da Iconicidade Verbal (TIV), as palavras organizadas para comunicar ideias possuem dimensão icônica (Simões, 2009). Uma obra literária, como um complexo de signos (verbais e não-verbais), carrega uma comunicabilidade. Ao ser extraída e manipulada pelo(a) leitor(a), a iconicidade dos signos é modelada por relações de similaridade, para que as ideias sejam compreendidas. Tais relações são construídas pela manipulação de níveis de iconicidade (diagramática, lexical e isotópica), expressos em marcadores linguístico-icônicos no texto (falado ou escrito) que estruturam e elaboram relações de semelhança para desenvolver uma temática (Simões, 2009).

O desenvolvimento de uma narrativa literária aproxima leitor(a) e escritor(a), não apenas pela disposição das relações de verossimilhança nos marcadores linguístico-icônicos, mas também por características do gênero literário. Ao considerarmos o uso de uma obra literária de fantasia na Educação Científica, a sensação de estranhamento que pode ser causada pela história se conecta aos conteúdos da Ciência, transformando o que parecia ser impossível em algo que é parte do mundo real (Ramos & Piassi, 2017). O livro *Alice no País do Quantum* (Gilmore, 1998) trata de uma alegoria da Física Quântica, explorada sob uma ótica de analogias e metáforas. Na narrativa, o comportamento do elétron é inserido em notas explicativas sobre a Mecânica Quântica e entre elementos fantásticos. Sabemos que o conceito de elétron está sob o entendimento da dualidade onda-partícula, que estabelece uma dialogicidade em um campo conceitual e epistemológico distante da lógica de nossa experiência macroscópica (Paulo & Moreira, 2011). Nesse sentido, reconhecemos na interface Ciência-Literatura pode fomentar o processo de construção de significados dos estudantes sobre um conceito que foge de nossa lógica habitual.

Diante deste arcabouço teórico, o objetivo deste artigo é analisar o processo de construção de significados do conceito de elétron, por um grupo de estudantes de um curso de licenciatura em Química, a

partir da abordagem da Mecânica Quântica na obra *Alice no País do Quantum* com base na Teoria da Iconicidade Verbal.

PSICOLOGIA CULTURAL SEMIÓTICA (PCS)

Para a Psicologia Cultural Semiótica, somos seres ativos no mundo através da cultura como pertencente aos artefatos do meio e às funções psicológicas humanas. Nesse sentido, a cultura é um processo dinâmico, conforme modificamos o meio, e vice-versa. Assim, somos sistemas funcionando culturalmente (Valsiner, 2012).

A partir dos papéis sociais que assumimos, a cultura desempenha suas funções através de processos de internalização e externalização. Dessa maneira, compreendemos esses processos como construções de significados no mundo e a partir dele. Processos de internalização ocorrem por meio da análise e síntese de materiais semióticos do meio. Ao estabelecer comunicações, o indivíduo irá executar processos de externalização, que também passam por análises e sínteses de materiais semióticos já internalizados. Internalizar e externalizar significados são processos que se alimentam mutuamente, e contam com a singularidade de cada indivíduo (Valsiner, 2012, 2014).

A dinâmica de construir e reconstruir significados no mundo edifica a cultura pessoal e coletiva. A cultura pessoal é desenhada pelos significados que são internalizados pelo indivíduo. No entanto, esses significados, dentro do processo dinâmico que viemos argumentando, não são fenômenos subjetivos estáticos (processos intrapsicológicos); eles também se constituem quando fazem parte dos processos interpsicológicos da pessoa (relações estabelecidas com o meio). A cultura coletiva, então, se insere em um sistema de constante mudança, em que os indivíduos estão construindo e reconstruindo significados (interna e externamente) nos meios em que se inserem (Valsiner, 2007).

O processo de construção de significados na cultura pessoal e coletiva acontece através da mediação de signos internalizados e externalizados (Valério & Lyra, 2014). Para Valsiner (2012), a mediação semiótica ocorre conforme os signos assumem o papel de recursos que usamos para significar o mundo ao nosso redor e a nossa relação com este. Ou seja, nós percebemos os objetos e os tornamos parte das relações intra e interpsicológicas que realizamos, para que eles ganhem significado. Isso ocorre por meio de processos de *semiose*, que são relações de representação desencadeadas à medida que agimos no mundo, criando *interpretantes* ou outros signos do signo referente (Peirce, 1894).

Significados são construídos através de complexos de signos. Estes se dão pela coexistência de categorias que, segundo a semiótica peirceana, são: similaridades com o que representam (ícones); indicações associadas a um objeto referente (índices); e convenções estabelecidas nos contextos (símbolos). Tais categorias se inserem nas operações mentais que realizamos quando interagimos com o mundo (Valsiner, 2012). Conforme essas operações estão mergulhadas na subjetividade dos indivíduos, estes medeiam os complexos de signos com objetos referentes, resultando em significações emergentes.

Na Educação Química, a linguagem da ciência é permeada por representações. Todavia, essas representações não são uma cópia da realidade. Por isso, nas relações dialógicas e dialéticas¹ (movimentos na cultura pessoal e coletiva) estabelecidas na sala de aula, direcionamos o olhar à construção de significados sobre fenômenos/conceitos científicos através da funcionalidade icônica dos signos, uma vez que é por meio dela que os indivíduos manipulam imagens mentais dos objetos referentes (Simões, 2009).

Dessa maneira, consideramos a iconicidade uma propriedade signica como ferramenta nos processos de semiose. Para permear este cenário, no próximo tópico, desenvolvemos uma discussão acerca da dinâmica dos processos de construção de significados por meio da iconicidade de signos, segundo a Teoria da Iconicidade Verbal.

TEORIA DA ICONICIDADE VERBAL (TIV)

Ao nos relacionarmos com objetos no mundo, ativamos representações mentais que nos possibilitam criar uma relação de significados com esses objetos. Esse processo é desencadeado pela iconicidade (similaridade) de signos que encontramos nas nossas experiências. Tais signos podem se associar a outros signos que não fazem parte da nossa experiência imediata, transformando o irreal em um objeto real para o

¹ Diálogos que estabelecemos nas relações intra e interpessoais, respectivamente (Valsiner, 2014).

indivíduo, por meio de processos de abstração/generalização (Valsiner, 2012). Nesse sentido, embora os signos se apresentem em complexos, destacamos a iconicidade como uma função sógnica potencialmente elaboradora de significados nas experiências dos indivíduos.

Segundo a TIV, o ícone é fonte primária do signo, pois sua relação na mediação de significados ocorre pela emergência de uma imagem mental que fundamenta qualquer outra relação sógnica (Simões, 2009). Dando um destaque para o signo verbal, este é mediado pela sua função lexicológica-semiótica em um texto (falado ou escrito). O texto se constitui como um complexo sógnico, que é (re)construído pelo indivíduo, conforme as palavras desencadeiam imagens mentais no pensamento (Simões, 2004, 2009). Nesse horizonte, um texto como um projeto comunicativo se constitui pelas relações que os léxicos estabelecem entre si na estrutura textual, emoldurando um cenário de interrelações que os indivíduos estabelecem por via da subjetividade e de relações de verossimilhança estabelecidas no corpo textual (Simões, 2007). Dessa maneira, os signos na organização textual são manipulados por meio da iconicidade, para a construção de significados.

O diálogo entre uma estrutura textual e processos cognitivos emergentes repousa sobre um solo de abstrações. A organização do texto é costurada pela iconicidade, através da qual um signo se relaciona com outros signos, além do seu interpretante. Dessa forma, uma narrativa se enquadra em uma perspectiva imagética e diagramática da construção de significados, desenhada por movimentos internos e externos que são realizados pelos indivíduos através da manipulação de níveis de iconicidade, sendo estes: diagramática, lexical, isotópica, alta ou baixa iconicidade e eleição de signos orientadores e desorientadores (Simões, 2009). Neste trabalho, focamos nos três primeiros níveis:

- Iconicidade diagramática: a forma com que palavras são dispostas no corpo do texto se constituem como um fio que guia a comunicação textual e uma consequente produção imagética no indivíduo;

- Iconicidade lexical: o uso de vocábulos que carregam no seu interior o potencial de ativar imagens mentais que serão manipuladas na construção de ideias sobre o texto;

- Iconicidade isotópica: as palavras usadas para comunicar uma mensagem assumem a função de âncoras textuais, pois sustentam uma temática que está sendo elaborada.

Tais níveis (ou tipos) de iconicidade não se apresentam de forma isolada; eles se apoiam um no outro para construir a comunicabilidade de um texto (Simões, 2009). Na sala de aula de Ciências, quando os estudantes realizam leituras, as representações semióticas que tecem a malha textual dialogam com as representações mentais dos indivíduos. Diante disso, consideramos refletir sobre como narrativas de ficção podem se constituir ferramentas potenciais para a aprendizagem de conceitos científicos, por meio da manipulação da iconicidade como uma função emergente nos complexos de signos.

TEXTOS DE FICÇÃO E O ENSINO E APRENDIZAGEM DE CIÊNCIAS

O desejo de acessar instâncias que escapam da nossa experiência imediata está tanto no trabalho artístico quanto no científico. Como produtos do trabalho da mente humana, a ciência e a ficção em livros, por exemplo, podem se encontrar para apresentar interesses de indivíduos inseridos em diferentes contextos socioculturais (Piassi, 2015). A interface Ciência-Arte nos leva, então, a refletir sobre as potencialidades educativas encontradas quando relacionamos essas esferas do saber.

Groto e Martins (2015) argumentam que o uso da obra literária *Serões de Dona Benta*, como um livro paradidático, pode proporcionar a contextualização de conceitos científicos, levando à discussões acerca da Natureza da Ciência. Estudantes do 9º ano do Ensino Fundamental II, em aulas de Ciências, realizaram atividades artísticas não verbais e com escrita, a partir de discussões pautadas em questionamentos levantados por personagens da obra sobre a importância das pesquisas básicas para a vida prática do ser humano, e como este pode usar o conhecimento científico de forma prejudicial à sociedade. Essas questões são enfatizadas através da forma com que os conceitos científicos são integrantes da história, levando os leitores a se identificarem com as questões presentes na narrativa.

A conexão entre a literatura e o ensino de Ciências da Natureza pode proporcionar relações que transcendem os campos de conhecimento individuais. Oliveira e Gonçalves (2019) fizeram uma análise da obra *Usina*, do escritor brasileiro José Lins do Rego, e constataram como a obra possibilita a abordagem de interconexões entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) na Educação Científica e Tecnológica. Uma abordagem pedagógica dessas relações, a partir do livro, pode permitir, para os autores, tratar de temas transversais, como as relações étnico-raciais. Dessa forma, se debruçar sobre temas dessa natureza em sala

de aula, pode colaborar para uma compreensão da ciência entrelaçada à sociedade e suas transformações. Nessa perspectiva, reconhecemos o papel da intersecção Ciência-Literatura na educação, pois esse encontro desenha a união de culturas que juntas comunicam questões prementes da sociedade: a cultura científica e humanística.

A produção e edição de obras literárias de comunicação científica contorna a apresentação de conceitos cientificamente corretos – de forma precisa e acessível. Por exemplo, as investigações de Araújo, Lima e Almeida (2023) sobre a obra *Isaac no Mundo das Partículas* (2018), de Erika Takimoto, elucidaram que a narrativa engloba a especificidade da linguagem científica para comunicar conceitos complexos. Nesse sentido, o trabalho de comunicação científica pela intersecção Ciência-Literatura, possivelmente pode contribuir para a (re)formulação de conceitos científicos. Diante disso, os pesquisadores recomendam uma investigação sobre como leitores internalizam esses conceitos com base nas configurações conceituais propostas no texto. Salientamos que, na Educação Científica, essa abordagem interdisciplinar também reflete as relações que estudantes e professores podem estabelecer nas construções de significados por meio de aspectos da linguagem literária.

Conceitos da física quântica são explorados nas interrelações que a ciência e a ficção estabelecem na narrativa de *Alice no País do Quantum*. Como um livro paradidático em sala de aula do Ensino Médio, os conceitos abstratos podem ser apreendidos por uma lógica analógica e metafórica explorada na narrativa. Para Souza e Neves (2016), que analisaram a obra em questão, a perspectiva com que os conceitos são abordados pode funcionar como ferramenta para o processo de aprendizagem, frente às dificuldades encontradas no diálogo entre uma visão probabilística do mundo e a realidade macroscópica. Os autores destacam que, embora a dimensão através da qual a narrativa se desenvolve esteja no âmbito da ficção, ela é mensurável no espaço natural. A realidade fantasiosa no País do Quantum constrói uma ponte para o estabelecimento de diálogos com uma realidade não palpável.

Alice no País do Quantum (1998), de Robert Gilmore, foi fortemente influenciada pela obra *Alice no País das Maravilhas* (1864), do matemático e escritor Lewis Carroll. Enquanto a narrativa de Alice no País das Maravilhas conduz a personagem por uma viagem imaginativa e fantasiosa repleta de enigmas matemáticos e lógicos, a Alice no País do Quantum vivencia e interage com fenômenos de uma realidade igualmente fantasiosa, porém “existente”. A obra de Gilmore (1998) é uma narrativa alegórica da física quântica, com conceitos da ciência quântica elucidados por meio de analogias entre as peripécias da personagem Alice e os fenômenos de uma realidade abstrata. Essa abordagem lança luz sobre o potencial da literatura fantástica na aprendizagem de conceitos científicos abstratos.

Ramos e Piassi (2017), ao analisarem narrativas do gênero fantástico, enfatizam o potencial educativo desses textos pelo emprego de características do estranho e do maravilhoso. A presença desses elementos pode suscitar uma hesitação reflexiva no leitor sobre concepções contraintuitivas nas narrativas e realidades físicas abstratas. Isso pode fomentar um cenário propício ao aprendizado, conforme os estudantes estabelecem relações com os conteúdos da Ciência, por vezes apresentada dentro de parâmetros contornados por ocorrências estranhas e fantásticas. Nesse horizonte, se constrói um caminho para a compreensão de que o impossível pode ser concebido como parte do real.

Este estudo propõe o uso da obra *Alice no País do Quantum* como ferramenta educativa com potencial para auxiliar no aprendizado do conceito de elétron – intrinsecamente ligado à apreensão probabilística do mundo a partir da Mecânica Quântica.

APRENDIZAGEM DO CONCEITO DE ELÉTRON NA MECÂNICA QUÂNTICA

A compreensão sobre o elétron como um dos constituintes fundamentais da matéria aconteceu sob prismas epistemológicos distintos ao longo da História da Ciência. Joseph John Thomson ao estudar raios catódicos, em 1897, colaborou para a identificação do elétron como dotado de massa e carregado negativamente (Silva, Santos & Dias, 2011). Nesse período, a ciência estava ancorada na física clássica. No entanto, no fim do século XIX, Max Planck apresentou que a natureza da matéria e da energia não poderia ser descrita pelos princípios clássicos. A partir do modelo de radiação do corpo negro, concluiu-se que um metal não poderia mais absorver ou irradiar energia de forma contínua; a uma dada frequência ν , um conjunto de osciladores (átomos) apresentaria energia quantizada, como múltiplo inteiro de $h\nu$, em que h é a constante de Planck (Almeida, 2005). Esse marco teórico contornou uma revolução na compreensão da realidade microscópica.

Em 1927, o experimento da dupla fenda resultou em observações empíricas que contrariaram o paradigma teórico vigente. Este experimento atribuiu aos elétrons padrões de interferência esperados para ondas, consolidando a concepção de dualidade onda-partícula, proposta pelo físico francês Louis De Broglie (Almeida, 2005). O interesse pela dinâmica de sistemas microscópicos envolveu diversos outros cientistas, como Erwin Schrödinger e Werner Heisenberg. Estes contribuíram para o entendimento de uma limitação intrínseca à tentativa de determinar simultaneamente a posição e velocidade de objetos quânticos, devido à natureza probabilística desses objetos (Novaes & Studart, 2016).

A partir das ideias de Montenegro e Pessoa Jr. (2002), consideramos que a teoria quântica possui interpretações, ou seja, conjuntos de teses que baseiam afirmações sobre fenômenos observados. Destacamos as quatro interpretações discutidas pelos pesquisadores: 1) a realidade é interpretada como um fenômeno ondulatório que, sob interferência de uma medição, é traduzido como uma não-localidade no sistema (interpretação ondulatória realista); 2) partículas possuem trajetórias bem definidas, no entanto, há uma incoerência, quando se observa padrões de interferência na análise de sistemas físicos envolvendo elétrons (interpretação corpuscular realista); 3) partícula e onda coexistem – há uma onda associada a um corpúsculo com trajetória bem definida (interpretação dualista realista); 4) a interpretação da complementaridade de Niels Bohr (1928) nos diz que só é possível afirmar a coexistência daquilo que podemos observar, logo, possuímos limitações em representar a realidade de sistemas microscópicos (interpretação dualista positivista). Na sala de aula de Química, essas interpretações se inserem nas relações didáticas não apenas nos conteúdos de livros e textos, bem como nas compreensões elaboradas e comunicadas por professores e estudantes.

Na Educação Científica, a aprendizagem do conceito de elétron estabelece relações com os parâmetros da ciência quântica, os quais contradizem a nossa experiência cotidiana. Estudos conduzidos por Baily e Finkelstein (2010) apontaram que estudantes matriculados em um curso de física moderna muitas vezes aplicam ferramentas matemáticas sem compreender correspondentes conceitos teóricos. Além disso, os estudos indicaram que alguns estudantes tendem a adotar uma interpretação realista do experimento da dupla fenda, embora isso não necessariamente defina que eles o fazem por desconhecer os princípios do mundo microscópico. A natureza contraintuitiva da MQ pode demandar um esforço mental maior para compreender conceitualmente como essa ciência se aplica à realidade. Portanto, é necessário que professores e estudantes construam relações didáticas que possibilitem reflexões mais aprofundadas acerca das interpretações dessa ciência e suas aplicações para compreender problemas do mundo real, indo além de uma simples aplicação de relações matemáticas.

Os movimentos cognitivos para compreender conceitos de natureza abstrata e contraintuitiva contam com relações lógicas feitas por estudantes e professores em sala de aula. As investigações de Didiş (2015) evidenciam que diferentes analogias (combinações de imagens, movimento corporal e apresentação verbal) são criadas pelos estudantes durante o ensino e a aprendizagem dos conceitos da teoria quântica, principalmente quando há uma transição do paradigma da física clássica à quântica. Embora as analogias possam se constituir como potenciais elementos instrucionais, para a pesquisadora, não se trata de usar a analogia pela analogia; é fundamental que o uso de analogias nas situações didáticas estabeleça conexões entre os elementos analógicos e seus equivalentes conceituais. Destacamos que retomar elementos do mundo macroscópico para compreender a lógica do mundo quântico pode representar um desafio à aprendizagem, pois os fenômenos do primeiro mundo não se aplicam diretamente ao segundo. Nesse contexto, é preciso que se considere de que maneira ferramentas didáticas estão sendo usadas na aprendizagem de conceitos científicos abstratos, dando ênfase ao papel do(a) professor(a) em selecionar estratégias pedagógicas mais eficazes.

Goff (2006) propõe uma abordagem inovadora ao introduzir o uso de um jogo, *quantum tic-tac-toe*, como uma metáfora da superposição de estados quânticos. Segundo o autor, o jogo funciona como um jogo da velha duplo, conforme se consegue associar simultaneamente o movimento a dois quadrados, como se pudesse existir dois valores para uma única variável. Esta ferramenta pedagógica explora uma compreensão visual da complexidade de fenômenos quânticos, o que estimula a imaginação dos estudantes, possibilitando um maior engajamento na aprendizagem de concepções contraintuitivas da física quântica.

Carvalho Neto, Freire Jr. e Silva (2009) estudaram as concepções de estudantes de um 3º ano do Ensino Médio antes e após a realização de um minicurso sobre os fundamentos da MQ. Os autores destacam que, ao analisar a fala de estudantes, inferiu-se que estes se apoiaram em significados prévios e reconheceram que a probabilidade na teoria quântica não se reduz às previsões estatísticas clássicas, mas é inerente à própria teoria. Em destaque, um dos estudantes declarou a dificuldade de estudar física sem imagens. Os autores argumentam a necessidade de investigação, pois os conceitos quânticos estão permeados por características que não podem ser expressas em imagens.

Paulo e Moreira (2011) apontam que o uso de uma linguagem clássica para apreender fenômenos quânticos deve ser contrabalanceada pela adoção de uma lógica distinta de nosso cotidiano. Nesse sentido, o processo de ensino e aprendizagem se constitui desafiador frente à negociação de significados a partir de uma visão de mundo determinística. Considerando a aprendizagem como uma construção de significados, corroboramos com a necessidade de introduzir abordagens metodológicas que proporcionem relações dialógicas e dialéticas em sala de aula, diante do âmbito conceitual e epistemológico da Mecânica Quântica.

PERCURSO METODOLÓGICO

Este trabalho apresenta uma metodologia de análise ideográfica (Schneider & Valle, 1995), a qual busca compreender a singularidade e complexidade de indivíduos ou casos específicos, priorizando a profundidade sobre a amplitude. Dessa forma justificamos a participação de dois estudantes nesta pesquisa, não havendo a necessidade de uma grande amostra de participantes para generalização dos resultados. Diante dos princípios da pesquisa ideográfica, utilizar apenas dois participantes permitiu uma análise aprofundada das experiências individuais, revelando nuances e particularidades que seriam diluídas em amostras maiores. Assim, analisamos dois estudantes de um curso de licenciatura em Química, de uma universidade pública do Estado de Pernambuco, os quais participaram de uma oficina que tinha como objetivo discutir o conceito de elétron. Os dois estudantes (A1 e A2) são uma mulher e um homem, do 9º e 5º período de curso, respectivamente. A escolha de A1 e A2, dentre os demais participantes da oficina, se justifica por ambos terem participado integralmente das atividades oferecidas, que teve como objetivo justamente usar o livro *Alice no País do Quantum* como material central para discussão do conceito de elétron.

Coleta de dados

Os dados foram coletados a partir da oficina *O Conceito de Elétron e a Mecânica Quântica*, realizada de forma on-line devido à situação da pandemia de COVID-19 durante os anos de 2020 e 2021. A oficina foi realizada no mês de setembro de 2021, com uma carga horária total de 10h. Os dados foram coletados em três momentos da oficina, a saber:

- 1) No primeiro momento síncrono, no aplicativo *Google Meet*, realizamos debates, que foram baseados na exibição de dois vídeos e na exposição das principais contribuições para o desenvolvimento da MQ. Ao fim desse momento, os participantes receberam o Questionário 1 (Quadro 1) disponível no aplicativo *Google Forms* sobre o que havia sido abordado, envolvendo escrita e experimentação com desenho, gerando os primeiros dados da pesquisa;

Quadro 1 – Perguntas do questionário 1.

1. O conceito de onda e partícula fazem parte da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica? Justifique.
2. Como o conhecimento da Mecânica Clássica poderia descrever o comportamento de partículas? Justifique sua resposta.
3. Como a compreensão da natureza do elétron pode se relacionar com o desenvolvimento da Mecânica Quântica?

- 2) De forma assíncrona, no segundo momento, os participantes receberam trechos pré-selecionados da obra *Alice no País do Quantum*, disponibilizados na plataforma *Google Classroom*, para serem lidos. Logo em seguida, os participantes foram solicitados, através do aplicativo *Google Forms*, a reformular o desenho do elétron.
- 3) Por fim, no terceiro momento, de forma síncrona, os estudantes discutiram os seus desenhos e alguns recortes dos trechos da obra. Para finalizar, os participantes foram solicitados a responder o Questionário 2 (Quadro 2), através do qual nós sondamos sobre a experiência dos estudantes com a leitura da obra para a aprendizagem do conceito elétron.

Quadro 2 – Perguntas do questionário 2.

1. Discorra sobre as relações e as dificuldades encontradas nos momentos de pensar na natureza do elétron a partir do desenvolvimento da Mecânica Quântica.
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?

Dessa forma, os dados analisados foram provenientes dos três questionários e da gravação e transcrição do segundo momento síncrono, em que os participantes discutiram sobre os desenhos reformulados e trechos do livro.

Análise de dados

Através de critérios *a priori* na literatura, construímos categorias de análise com base na TIV para a identificação da manipulação de níveis de iconicidade durante a construção de significados sobre o conceito de elétron. Assim, analisamos os questionários e a transcrição da gravação do segundo encontro síncrono, em termos das ideias de Simões (2009) a partir dos seguintes critérios:

- Iconicidade diagramática: organização do texto (falado ou escrito) a partir da combinação de léxicos para representar ideias. Por exemplo, quando os estudantes escolheram expressões que, quando organizadas, representaram o comportamento do elétron em uma realidade microscópica.

- Iconicidade lexical: ao se apoiar na iconicidade diagramática, os léxicos refletem marcas expressivas na mensagem que se busca comunicar. Por exemplo, quando os participantes escolhem códigos léxicos para evocar seus raciocínios acerca da compreensão do elétron na realidade quântica, a partir da qual a dualidade onda-partícula se expressa.

- Iconicidade isotópica: o uso de palavra e expressões conduzem uma trilha temática. Por exemplo, quando os estudantes selecionam itens léxicos para sustentar suas ideias sobre o conceito elétron nas perspectivas clássica e quântica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar como o texto ficcional influenciou na construção de significados sobre o conceito elétron, nós dividimos a construção dos dados e a discussão a partir dos momentos realizados ao longo da oficina. Essa organização considerou apresentar recortes dos discursos dos participantes, tomando como base a emergência da manipulação dos níveis de iconicidade na construção de significados sobre o elétron.

Análise do Questionário 1 e da primeira versão do desenho

No Quadro 3, apresentamos as respostas dos participantes A1 e A2 ao questionário 1, selecionadas a partir dos nossos critérios de análise.

Para externalizar o seu raciocínio, na pergunta 1, A1 organiza palavras e expressões que funcionam como um guia da imagem icônica da sua fala sobre os conceitos de onda e partícula nas perspectivas clássica e quântica. Isso acontece a partir da manipulação da iconicidade diagramática, através das expressões “Na mecânica clássica houve experimentos que mostraram estes dois comportamentos” e “Na mecânica quântica foi proposto que estes comportamentos poderiam aparecer simultaneamente”. Essas expressões servem de apoio para uma manipulação da iconicidade lexical nos vocábulos “mecânica clássica”, “experimentos”, “dois comportamentos”, “mecânica quântica”, “estes comportamentos”, “simultaneamente” e “experimento poderia favorecer o aparecimento de um destes comportamentos”, cujos emanam relações de similaridade com o tratamento que os conceitos de onda e partícula tiveram na Mecânica Clássica e Quântica. A eleição de um conjunto de léxicos usados para comunicar as visões clássica e quântica demonstram a intenção em conduzir ideias sobre o tema, através da manipulação da iconicidade isotópica.

Quadro 3 – Perguntas e respostas de A1 e A2 ao questionário 1.

A1	A2
1. O conceito de onda e partícula fazem parte da Mecânica Clássica e da Mecânica Quântica? Justifique.	
<i>[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.</i>	<i>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 subseqüentes, foi atestado a possibilidade do [elétron possuir comportamento de onda e partícula], e [na mecânica clássica ambos comportamentos eram bem diferentes].</i>
2. Como o conhecimento da Mecânica Clássica poderia descrever o comportamento de partículas? Justifique a sua resposta.	
<i>[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].</i>	<i>[Acredito, que objetos muito pequenos] impossíveis de serem enxergados com o olho humano. Além disso, essas [partículas possuíam comportamentos definidos].</i>
3. Como a compreensão da natureza do elétron pode se relacionar com o desenvolvimento da Mecânica Quântica?	
<i>Por meio do experimento do efeito fotoelétrico, dualidade onda-partícula e dos experimentos da fenda.</i>	<i>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].</i>

Na pergunta 2, A1 se baseia no modelo atômico proposto por Thomson para descrever a sua compreensão sobre o comportamento de uma partícula. Os léxicos “modelos atômicos baseados em subpartículas”, “modelo de Thompson”, “átomo” e “partículas carregadas negativamente encrustadas no átomo maciço” corroboram para uma relação icônica do comportamento do elétron como uma partícula a partir de um modelo atômico, por meio da manipulação da iconicidade lexical. A manipulação da iconicidade diagramática e isotópica no uso e na organização das expressões “através dos modelos atômicos baseados em subpartículas como no caso do modelo de Thompson” e “o átomo composto por partículas carregadas negativamente encrustadas no átomo maciço” constroem uma representação icônica do elétron como uma partícula em um modelo atômico.

Para A1, através da realização de alguns experimentos durante o desenvolvimento da Mecânica Quântica houve mudanças na compreensão da natureza do elétron. Na pergunta 3, a estudante manipula as iconicidades lexical e isotópica ao usar as expressões “experimento do efeito fotoelétrico”, “dualidade onda-partícula” e “experimentos da fenda”, que assumem a função de estabelecer relações icônicas com o elétron, conforme corroboram com a intencionalidade da participante em destacar as mudanças que ocorreram em termos da compreensão da natureza do elétron segundo a Mecânica Quântica.

Na pergunta 1, A2 manipula níveis de iconicidade ao recapitular uma discussão durante a oficina sobre uma nova visão para fenômenos investigados por volta do século XIX (Almeida, 2005). Pelas expressões “possuem vertentes diferentes, ou seja, visões opostas. Na Mecânica Quântica”, “elétron possuir comportamento de onda e partícula” e “na mecânica clássica ambos comportamentos eram bem diferentes” o estudante manipula a iconicidade diagramática para representar relações de semelhança, a partir da organização do discurso, com o desenvolvimento da Mecânica Quântica e como isso trouxe uma nova visão para o comportamento do elétron. As palavras “visões opostas”, “Na Mecânica Quântica, a partir da denominação quantum”, “Max Planck”, “elétron”, “comportamento de onda e partícula” e “mecânica clássica ambos os comportamentos eram bem diferentes” corroboram para uma construção dessas relações de semelhança, a partir de uma manipulação da iconicidade lexical, para se aproximar de uma representação

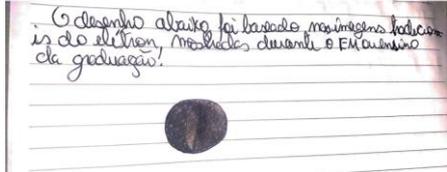
icônica do comportamento dual do elétron. As expressões ligadas a uma visão probabilística de mundo se relacionam à iconicidade isotópica na construção de uma temática.

Na pergunta 2, A2 associa ao comportamento de partículas a ideia de que “são objetos muito pequenos impossíveis de serem enxergados com o olho humano”, destacando que essas “partículas” têm “comportamentos definidos”. Os termos destacados possuem dimensão icônica conforme representam o comportamento de uma partícula por meio da iconicidade lexical. A organização das expressões “acredito, que objetos muito pequenos” e “partículas possuíam comportamentos definidos” demonstra uma manipulação da iconicidade diagramática ao desenhar a ideia de uma partícula na perspectiva clássica.

Para A2, o cientista De Broglie corroborou para a compreensão de fenômenos do mundo microscópico. A iconicidade lexical é manipulada pelo conjunto de léxicos “afirmação de Broglie”, “difração dos elétrons” e “considerada apenas com partículas, e não com corpos grandes” que possui iconicidade ao evocar relações de similaridade do comportamento dual dos elétrons em uma escala microscópica, mediante a observação do fenômeno de difração. A manipulação desses léxicos também aponta à iconicidade isotópica ao fundamentarem o conteúdo expresso. As expressões “com a afirmação de Broglie” e “considerada apenas com partículas, e não com corpos grandes” representam de forma icônico-imagética o comportamento dos elétrons por meio da iconicidade diagramática.

Para analisar a materialização de imagens nos processos de internalização e externalização dos materiais semióticos na construção de significados, ainda no Questionário 1, solicitamos aos participantes que ilustrassem, em um desenho, os seus entendimentos sobre a partícula elétron. Salienciamos que a palavra “partícula” no enunciado pode ter influenciado na forma com que os estudantes construíram suas representações (Quadro 4), levando em consideração as diversas interpretações da Mecânica Quântica, em destaque a interpretação da complementaridade. As representações mostradas no Quadro 4 indicam como estudantes retomam elementos conhecidos no mundo macroscópico para representar entidades quânticas. Além disso, possivelmente, há a influência de diversas representações, em sua grande maioria de natureza icônica, presentes em livros didáticos e outros materiais de instrução, em que o elétron é representado majoritariamente em sua forma de partícula (esfera). Este resultado é semelhante ao encontrado no estudo de Montenegro e Pessoa Jr. (2002).

Quadro 4 – Desenhos produzidos antes da leitura.

Primeira versão do desenho	
A1	A2
 <p>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.</p>	 <p>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>

Ao explicar a primeira versão do seu desenho, A1 apresentou marcadores em seu discurso que constituíram uma dimensão icônica do comportamento do elétron. A manipulação da iconicidade lexical apareceu através da escolha das palavras e expressões “partícula”, “ondas” e “não daria para diferenciar tanto” em uma relação de verossimilhança com o comportamento do elétron na Mecânica Quântica. A organização desses vocábulos, postos em diálogo com as expressões “como eu imaginaria que eu fosse representar ao meu aluno” e “um monte de partículas e um monte de ondas junto”, que abrem e fecham a fala de A1, constituem a manipulação da iconicidade diagramática na tentativa de demonstrar iconicamente a compreensão da participante ao representar o elétron.

O desenho de A2 constituiu uma representação do elétron na perspectiva clássica, a partir das experiências do participante no Ensino Médio e na graduação. A funcionalidade dos léxicos “Mecânica Clássica”, “imagem”, “representação do elétron”, “círculo pintado” e “carga” expressam uma manipulação da iconicidade lexical para representar (ou tentar expressar) uma imagem icônica do que ele compreende ser o elétron, ou seja, o que ele imagina quando discute sobre o elétron. Nesse sentido, a maneira com que esses léxicos são organizados na fala aponta a uma manipulação da iconicidade diagramática, que favorece a comunicação de uma representação icônico-imagética do elétron.

Análise da discussão dos trechos lidos

Ainda no segundo encontro síncrono, nós lemos e discutimos alguns recortes dos trechos que os participantes haviam lido no momento assíncrono. Proporcionamos que os estudantes verbalizassem sobre a experiência com a leitura, para analisarmos a influência da iconicidade na obra para a construção de significados sobre o elétron.

Destacamos um recorte em que a personagem Alice, ao entrar no “Instituto de Mecânica”, se encontra com o mecânico clássico e o mecânico quântico (Figura 1). O texto desta cena descreve o mecânico clássico como uma figura que olhava para Alice com tamanha precisão que podia captar os detalhes mais minuciosos do que observava; ao contrário do mecânico quântico, que não se podia saber para onde ele estava olhando ao certo, ou até mesmo onde estavam os seus olhos. Além disso, na blusa do mecânico quântico, havia uma imagem que não se podia dizer exatamente o que era, e que talvez se parecesse vagamente com um átomo, embora tivesse cores difusas (Gilmore, 1998).

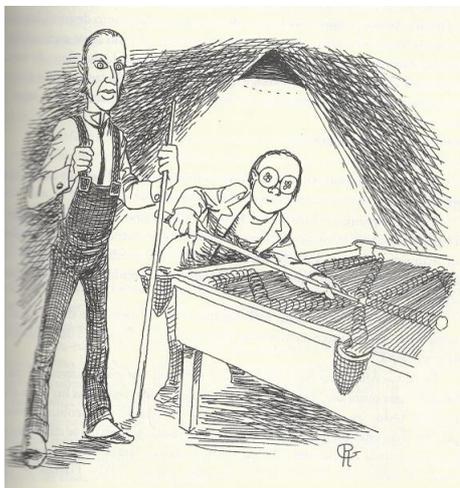


Figura 1 – O mecânico clássico (à esquerda) e o mecânico quântico (à direita) (extraído de Gilmore, 1998, p. 41).

No Quadro 5, incluímos as falas dos participantes a partir da cena apresentada acima.

Quadro 5 – Discussão de A1 e A2 sobre o trecho envolvendo os mecânicos clássico e quântico.

A1	A2
<p>[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].</p>	<p>[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].</p>

A seleção de léxicos pelos participantes, a partir da iconicidade nos complexos de signos (verbal e não-verbal) nos trechos, constituiu a comunicação de ideias sobre o elétron. As expressões “no início, quando eu li... Eles estão juntos...” e “A Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica não são inimigas em si, mas têm pontos de vistas diferentes” emolduram a imagem do texto verbalizado por A1, para representar de forma

icônico-imagética (iconicidade diagramática) uma relação entre o universo figurado na obra com os aspectos inteligíveis e possíveis nas perspectivas clássica e quântica. Ao expressar “eles estão juntos”, “a Mecânica Clássica e a Mecânica Quântica não são inimigas em si” e “têm pontos de vistas diferentes”, A1 manipula léxicos da obra (iconicidade lexical) e os dialoga com a Natureza da Ciência, construindo relações de similaridade entre as Mecânicas Clássica e Quântica, uma vez que a segunda não excluiu a aplicabilidade da primeira; as interpretações dos *mecânicos* sobre fenômenos naturais são direcionadas a sistemas físicos distintos.

Nosso estudo corrobora com a ideia de dialogicidade proporcionada pela relação Literatura-Ciência, tal qual discutida no trabalho de Groto e Martins (2015). Destacamos que essa relação abrange não somente questões dialógicas, mas também dialéticas, conforme significados internalizados e externalizados são mediados pela iconicidade nos complexos de signos na obra, construindo e reconstruindo a cultura pessoal e coletiva (Valsiner, 2012; Valério & Lyra, 2014) na sala de aula, permeando aspectos históricos, sociais e culturais.

No discurso de A2, as palavras e expressões “óculos”, “difícil perceber para onde ele estava olhando”, “algo que não é fixo, não é certo” e “associei ao elétron” se relacionaram iconicamente com a incerteza da posição do elétron segundo a Mecânica Quântica, representando uma manipulação da iconicidade lexical para significar o comportamento do elétron em escala microscópica. Através de “a parte que fala dos óculos” e “eu imaginei isso, e associei ao elétron” observamos uma manipulação da iconicidade diagramática, constituindo uma demonstração icônica, através da imaginação, da influência da iconicidade presente nos óculos do *mecânico quântico* para significar o comportamento do elétron.

A iconicidade nos complexos de signos da obra é retomada na aprendizagem por meio da manipulação de configurações verbais e não-verbais. Em destaque, notamos, nos discursos dos estudantes, como os aspectos da narrativa ficcional presentes nos desenhos foram explorados e submetidos a comparações visuais entre as teorias clássica e quântica. Segundo Piassi (2015), as relações ficcionais no texto de *Alice* possibilitam uma reprodução alegórica de objetos do mundo quântico. Sabemos que, na sala de aula de Química, imagens são ferramentas didáticas fortemente exploradas para possibilitar a significação do mundo natural. No entanto, no contexto das interpretações da teoria quântica, é necessário possibilitar formas de significar objetos microscópicos que suscitem ponderações sobre seus comportamentos na realidade macroscópica. Nesse sentido, as imagens icônicas internalizadas e externalizadas pelos indivíduos sob influência da obra podem contribuir para a aprendizagem, à medida que professores e estudantes criem reflexões em sala de aula sobre as características dos conceitos e a forma como são representados nas imagens.

Reforçamos que, segundo a Psicologia Cultural Semiótica, a aprendizagem é um processo de construção de significados, em que o que é externalizado pelo indivíduo é um material modificado por processos de análise e síntese de materiais semióticos já internalizados, construindo novos ciclos de internalização e externalização sucessivos a partir de novos signos e significados (Valsiner, 2012). Nesse sentido, nossa contribuição aponta que os aspectos linguístico-semióticos, expressos na fala e escrita de estudantes, são signos icônicos (imagens mentais) mediadores na aprendizagem. A influência da iconicidade nos complexos de signos da narrativa ficcional se relaciona às negociações subjetivas e interrelações histórico-culturais (Simões, 2007, 2009) que encontram sua gênese através do desenvolvimento da imaginação.

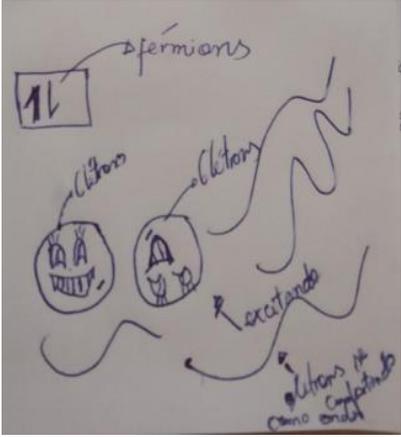
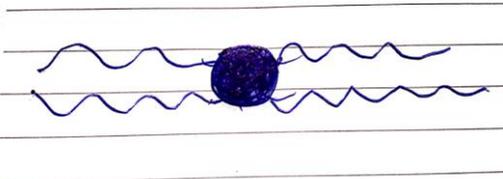
Análise da discussão sobre os desenhos reformulados

Por meio do *Google Classroom*, disponibilizamos aos participantes trechos pré-selecionados da obra, para serem lidos de forma assíncrona. Solicitamos que, após a leitura, os participantes reformulassem o desenho do elétron (Quadro 6). Proporcionamos que os participantes falassem sobre os seus desenhos em um segundo momento síncrono, a fim de analisar a materialização da iconicidade dos signos mediadores na fala dos participantes.

A segunda versão do desenho de A1 foi explicada a partir de palavras e expressões que apresentaram iconicidade do comportamento do elétron no mundo microscópico. As unidades léxicas “zoom”, “fótons”, “bósons”, “elétrons”, “férmions”, “eles são iguais”, “têm que estar opostos”, “Princípio de Pauli”, “forma animada”, “imaginei”, “um de cabeça pra baixo, e o outro”, “se excitam”, “luz”, “onda”, “caixinha”, “orbital”, “eles estão aí dentro” e “região de probabilidade” denotam uma manipulação da iconicidade lexical, pela função icônica de aproximar à imaginação o comportamento do elétron em uma realidade microscópica. A organização das expressões “eu fiz o zoom” e “eu imaginei muita coisa, mas fui assim” guiaram a fala por

meio da manipulação da iconicidade diagramática, expressa na imagem icônica do discurso em diálogo com os elementos da ilustração.

Quadro 6 – Reformulação do desenho após a leitura.

Segunda versão do desenho	
A1	
	<p>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.</p>
A2	
	<p>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>

Ao ser questionada sobre se havia mudado algo em relação ao primeiro e segundo desenho, a resposta de A1 indicou uma influência da criatividade em relação ao segundo desenho, através de um animismo, quando ela apresenta os elétrons sorrindo e um de cabeça para baixo em relação ao outro. No entanto, a estudante comenta que se fosse explicar o assunto para um estudante do Ensino Médio, ela usaria o primeiro desenho, por ser algo mais sério para tentar proporcionar que o estudante entendesse um pouco a respeito. Para Souza e Neves (2016), a antropomorfização de seres inanimados, como o elétron, faz parte da troca entre a linguagem científica e a linguagem ficcional, que constroem um cenário de aproximação aos conteúdos científicos relacionados a um mundo concreto não palpável. No entanto, consideramos importante destacar que o aparecimento de um animismo deve ser considerado sob ressalvas, pois, em sala de aula, ele pouco contribuiria para a significação de um conceito científico. Porém, a influência lúdica da obra, esta sim deve ser explorada.

No segundo desenho de A2, a influência do lúdico se expressou a partir do engajamento com a leitura, conforme o estudante passou a imaginar aspectos do elétron, embora estes tenham se expressado por meio de um momento de discussão no primeiro encontro síncrono. Os códigos verbais “hidrogênio”, “orbital s”, “plano nodal”, “ondas” e “partícula e onda” constituem uma manipulação da iconicidade lexical, à medida que emana, dos próprios léxicos, uma relação de semelhança com o que buscam representar, ou seja, um elétron em um átomo de hidrogênio, que, em uma perspectiva probabilística de ser encontrado no átomo, assume um comportamento de partícula e onda. As expressões “eu tava pensando em representar igual foi...” e “quer saber? Eu vou colocar aqui umas ondas, aí aqui é partícula e onda” organizam de forma icônico-imagética as ideias que o participante busca comunicar, demonstrando, assim, uma manipulação da iconicidade

diagramática. Além disso, a iconicidade isotópica foi manipulada pelos vocábulos selecionados, que ancoraram a temática desenvolvida na sua explicação: o elétron na Mecânica Quântica.

Como viemos argumentando, o desenvolvimento da imaginação fomenta os movimentos cognitivos (expressos nos significados internalizados e externalizados) que os indivíduos realizam para significar um conceito de natureza abstrata. A sua manifestação no mundo físico excita a necessidade de dar ênfase para aspectos da ciência quântica, para que esse conceito possa ganhar significado na cultura pessoal e coletiva. Diante disso, os estudantes podem selecionar diferentes interpretações dessa ciência em situações diferentes, como já foi observado por Montenegro e Pessoa Jr. (2002). Nesse estudo, notamos que os participantes se apoiaram em interpretações corpuscular realista e dualista realista da teoria quântica, que pode ter tido influência da forma com que fizemos alguns questionamentos durante a oficina. Porém, queremos destacar o papel do lúdico na narrativa, em termos de despertar um maior interesse dos estudantes em construir relações icônicas do elétron. Assim, acreditamos ser possível criar potenciais relações didáticas em sala de aula, quando as interpretações expressas pelos estudantes são exploradas sob uma ótica ficcional, visando uma compreensão conceitual da natureza do mundo quântico.

Análise do Questionário 2

Para finalizar a oficina, nós realizamos dois questionamentos, a fim de sondar quais aspectos da narrativa exerceram influência nas relações de mediação semiótica para significar o elétron (Quadro 7). Nossa hipótese foi a de que as características da narrativa ficcional de *Alice*, ao se relacionarem com a iconicidade dos signos na obra, pudessem ser retomadas nos processos de semiose sobre o elétron. A análise do discurso dos participantes nos possibilitou observar que cenas dos trechos são recapituladas durante a manipulação de níveis de iconicidade na construção de significados, para estabelecer relações de similaridade com fenômenos em uma realidade microscópica e com lógica própria.

Quadro 7 – Últimas perguntas feitas aos participantes e suas respectivas respostas.

A1	A2
<p>1. Discorra sobre as relações e as dificuldades encontradas nos momentos de pensar na natureza do elétron a partir do desenvolvimento da Mecânica Quântica.</p>	
<p><i>[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].</i></p>	<p><i>[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].</i></p>
<p>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?</p>	
<p><i>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].</i></p>	<p><i>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].</i></p>

As concepções apresentadas no Ensino Médio, para A1, sobre o elétron ser uma partícula se constituem como obstáculos na hora de representar o comportamento dual do elétron. Diante dos vocábulos “o elétron ser uma partícula”, “capacidade dual” e “comportamento simultâneo” na resposta da pergunta 1, a estudante manipula a iconicidade lexical, a fim de desenhar relações de similaridade para representar as diferenças de comportamento de fenômenos associados às partículas no âmbito macro e microscópico. Os termos em destaque, ao se associarem às expressões “é difícil quebrar a ideia apresentada no ensino médio sobre o elétron ser uma partícula” e “teria que mostrar que o elétron tem esse comportamento simultâneo”, representam uma manipulação da iconicidade diagramática para organizar verbalmente a compreensão da participante acerca da natureza do elétron.

A fala de A1, na pergunta 2, se apoiou nas expressões “o mecânico quântico bombardeia as duas fendas”, “comportamento dual do elétron”, “única partícula elétron passa pelas duas fendas” e “se comporta como uma onda” para apresentar uma compreensão da dualidade do elétron. Essas expressões indicaram uma manipulação da iconicidade lexical, a partir da retomada de uma cena da obra, que é (re)desenhada pela funcionalidade das palavras referentes à ilustração e à narrativa ficcional, através das quais a dualidade do elétron se expressa no experimento da dupla fenda. A forma com que as expressões “no trecho que o mecânico quântico bombardeia as duas fendas” e “elétron passa pelas duas fendas quando se comporta como uma onda” são distribuídas na fala se refere à iconicidade diagramática, na tentativa de guiar uma compreensão sobre o comportamento do elétron com base na iconicidade do complexo de signos presente no trecho do livro.

Na pergunta 1, A2 declara que a sua dificuldade em compreender a natureza do elétron se associa à necessidade de uma concepção não-intuitiva. Os léxicos “compreensão diferente do comum”, “a natureza do elétron divide concepções diferentes” e “uma nova visão acerca da natureza do elétron” constituem, por meio da manipulação da iconicidade lexical, marcas expressivas que representam as dificuldades do participante ao se deparar com as formas de interpretar o comportamento do elétron em escala microscópica. Ao usar as expressões “as principais dificuldades estão atreladas a difícil aceitação” e “dificuldade para a consolidação de uma nova visão acerca da natureza do elétron” estas corroboram como um guia do raciocínio de A2, ao construir relações de similaridade pela maneira com que as palavras se organizam, através da manipulação da iconicidade diagramática.

A2, ao usar as expressões “conceitos quânticos e acontecimentos da obra”, “o local em que a história da obra é contada”, “uma comparação a obra de Alice no país das maravilhas”, “ambos os mundos não fazem muito sentido, seja o de Alice ou o quântico” e “quando comparado ao mundo macroscópico, é difícil de ser compreendido”, manipula a iconicidade lexical, à medida que esses vocábulos funcionaram como funções icônicas do estranhamento associado ao mundo microscópico, que se entrelaça às peripécias vividas pela personagem Alice, no *País do Quantum*, onde acontecem fenômenos que não seguem a lógica macroscópica. As expressões “o local em que a história da obra é contada” e “quando comparado ao mundo macroscópico, é difícil de ser compreendido” demonstram uma manipulação da iconicidade diagramática como uma representação icônico-imagética do contexto da obra, através do qual A2 constrói sua compreensão sobre o mundo quântico.

A natureza do mundo quântico parece impossível frente à nossa realidade imediata. Nesse horizonte, o discurso literário em *Alice no País do Quantum* se dá pelas formas de pensar os conteúdos da teoria quântica, na narrativa alegórica, que se constrói por elementos fantasiosos e metáforas (Piassi, 2015). O *País do Quantum*, com seus elementos fantasiosos, não é o mundo quântico em si, mas se apresenta por metáforas que ascendem experiências de pensamento para elucidar a lógica funcional quântica. Para Ramos e Piassi (2017), o fantástico constrói possibilidades educacionais. Os elementos fantásticos em uma narrativa nos convidam a duvidar sobre a nossa compreensão do mundo, abrindo espaço para que, por exemplo, o estranhamento associado ao princípio da incerteza de Heisenberg, no *País do Quantum*, torne o impossível como parte do real.

As potencialidades educacionais suscitadas pela interconexão Ciência-Literatura podem nos proporcionar explorar ideias que transcendem as páginas da obra. A incerteza intrínseca ao mundo quântico não apenas se entrelaça às nossas compreensões, como também desafiou diversas mentes ao longo da História da Ciência. Isso pode catalisar discussões em sala de aula acerca de como o desenvolvimento da ciência quântica mudou as relações entre ciência, tecnologia e sociedade, tal qual Oliveira e Gonçalves (2019) observaram articulações entre ensino, tecnologia e sociedade a partir da obra *Usina*. Salientamos que essas articulações podem ser potencializadas quando consideramos as experiências de pensamento proporcionadas pela configuração semiótica no discurso fantasioso de *Alice no País do Quantum*. Dessa forma, podemos construir relações na Educação Científica que corroboram para que os estudantes aprendam uma ciência que se insere nos desafios do mundo contemporâneo.

Reforçamos nossos argumentos de que é pela iconicidade como propriedade dos signos que os aspectos da narrativa ficcional de *Alice* são retomados na aprendizagem. As elaborações linguístico-semióticas construídas no projeto comunicativo do texto se edificam pelas relações de semelhança estabelecidas em signos que remetem a outros signos que se materializam no pensamento (Simões, 2007, 2009). Dessa maneira, interpretamos a aprendizagem como uma construção de significados (Valsiner, 2012), constantemente em transformação, à medida que os estudantes manipulam níveis de iconicidade em seus discursos para externalizar as suas compreensões sobre o elétron na Mecânica Quântica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pesquisas que abordam a interface Ciência-Literatura na Educação em Ciências demonstram como essa relação cria potencialidades didáticas para a aprendizagem de conceitos (Groto & Martins, 2015; Piassi, 2015; Souza & Neves, 2016; Ramos & Piassi, 2017; Araújo, Lima & Almeida, 2023). Em destaque, as narrativas fantasiosas se associam a níveis de abstração de conceitos científicos, corroborando com experiências de pensamento para a aprendizagem. Este estudo, com base na Psicologia Cultural Semiótica, deu enfoque à maneira com que a aprendizagem do conceito de elétron acontece a partir dos elementos de um discurso fantasioso, considerando a aprendizagem como uma construção de significados mediada por signos, analisada a partir da Teoria da Iconicidade Verbal. Essa construção é complexa, e sob a perspectiva dos referenciais adotados, considera uma articulação entre a linguagem da ciência quântica e os processos de significação dos estudantes na aprendizagem a partir de um texto de ficção, articulação essa que pode ser entendida como a principal contribuição desse trabalho para a literatura.

Ao analisarmos a fala e a escrita de participantes ao longo de uma oficina sobre o conceito de elétron e a Mecânica Quântica, argumentamos que os estudantes constroem significados sobre o conceito conforme manipulam níveis de iconicidade ao retomarem funções icônicas na obra *Alice no País do Quantum*. Os níveis de iconicidade são manipulados pela organização de signos (marcadores linguístico-semióticos) que estabelecem relações de semelhança com outros signos icônicos (imagens mentais), mediados pelos aspectos estranhos e absurdos encontrados na obra. Essa mediação também leva em consideração significados já internalizados, que se entrelaçam com os novos signos e significados construídos a partir das externalizações e internalizações sucessivas das compreensões dos estudantes, (re)construindo a cultura pessoal e coletiva na sala de aula.

A transformação diagramático-imagética da narrativa, através da manipulação dos níveis de iconicidade, também contou com a retomada de configurações semióticas não-verbais. Foi possível perceber que os estudantes fizeram comparações entre as teorias clássica e quântica a partir de desenhos na obra. Isso nos possibilitou inferir que as relações alegóricas, também presentes nas ilustrações em *Alice*, podem se constituir como ferramentas didáticas. Ao explorar imagens em sala de aula para significar o mundo real, professores podem trazer elementos ficcionais da narrativa para a prática, criando possibilidades de significar conteúdos abstratos, em termos de discutir a substância destes e a forma com que são representados nas imagens.

Explorar discussões sobre a teoria quântica na sala de aula de Química, sob uma ótica ficcional, nos leva a destacar o aspecto lúdico na interface Ciência-Literatura. A partir deste estudo, observamos que os movimentos imaginativos que os estudantes fizeram para significar o elétron, por meio dos elementos ficcionais na obra, se entrelaçaram com interpretações da teoria quântica selecionadas pelos estudantes a partir de questionamentos que fizemos ao longo da oficina. Nesse sentido, acreditamos que proporcionar reflexões sobre a iconicidade dos signos retomados pelos estudantes, mediante a narrativa fantasiosa, pode promover o aprofundamento da compreensão conceitual acerca de uma concepção de natureza abstrata.

Além disso, a interdisciplinaridade na aprendizagem pode indicar possibilidades de discutir concepções transcendentais à narrativa, perspectiva já apontada por Oliveira e Gonçalves (2019). As relações de similaridade nos signos mediadores da aprendizagem, ao se relacionarem com a incerteza intrínseca ao mundo quântico, ascendem as experiências de pensamento suscitadas pelo discurso fantasioso em *Alice no País do Quantum*. Dessa maneira, professores podem catalisar discussões em sala de aula sobre como a ciência quântica mudou as relações entre ciência, tecnologia e sociedade, promovendo relações dialógicas e dialéticas para a aprendizagem de uma ciência pertencente aos desafios do mundo contemporâneo.

Diante disso, fornecemos as bases teóricas e empíricas para analisar a aprendizagem de um conceito científico a partir do uso da literatura fantástica. Nossos achados mostram que o uso dessas narrativas na Educação Científica vai além de introduzir a leitura e a discussão delas. Ao adotar textos de ficção para a aprendizagem de um conceito bastante complexo, educadores podem otimizar o processo de aprendizagem,

conforme consideram as relações entre a configuração semiótica do texto de ficção e os processos de semiose construídos pelos estudantes.

Este estudo apresenta limitações no que diz respeito à necessidade de análises mais aprofundadas sobre como estudantes interagem e manipulam signos de natureza icônica em função do processo de compreensão de um conceito abstrato. Estudos futuros podem ser desenvolvidos no sentido de avaliar quais aspectos da narrativa ficcional podem ser constituídos como promotores ou inibidores da aprendizagem com base nessa manipulação semiótica, considerando como isso pode refletir na mudança de práticas para uma melhoria dos processos de ensino e aprendizagem.

REFERÊNCIAS

- Almeida, R. L. de. (2005). O nascimento da mecânica quântica. *Revista Uningá*, 4(1), 145-151. <https://doi.org/10.46311/2318-0579.4.eUJ391>
- Araújo, J. F. V., Lima, G. S., & Almeida, S. A. (2023). Presentation of concepts in a children's science communication book: the case of "Isaac no Mundo das Partículas". *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, 25(1), e39775. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21172022240136T>
- Baily, C., & Finkelstein, N. D. (2010). Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses. *Physical Review Physics Education Research*, 6(1), 010101-1-010101-11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.010101>
- Carvalho Neto, R. A. D., Freire Jr., O., & Silva, J. L. P. (2009). Improving students' meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. *Investigações em Ensino de Ciências*, 14(1), 65-81. Recuperada de <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/410>
- Didiș, N. (2015). The analysis of analogy use in the teaching of introductory quantum theory. *Chemistry Education Research and Practice*, 16(2), 355-376. <https://doi.org/10.1039/C5RP00011D>
- Gilmore, R. (1998). *Alice no País do Quantum: a Física Quântica ao alcance de todos*. Rio de Janeiro, RJ: Zahar.
- Goff, A. (2006). Quantum tic-tac-toe: A teaching metaphor for superposition in quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 74(11), 962-973. <https://doi.org/10.1119/1.2213635>
- Groto, S. R., & Martins, A. F. P. (2015). Monteiro Lobato em aulas de ciências: aproximando ciência e literatura na educação científica. *Ciência & Educação (Bauru)*, 21(1), 219-238. <https://doi.org/10.1590/1516-731320150010014>
- Lima, L. G. de., & Ricardo, E. C. (2019). O ensino da Mecânica Quântica no nível médio por meio da abstração científica presente na interface Física-Literatura. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 36(1), 8-54. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2019v36n1p8>
- Montenegro, R. L., & Pessoa Jr., O. (2002). Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, 7(2), 107-126. Recuperada de <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/564>
- Novaes, M., & Studart, N. (2016). Densidade e probabilidades quânticas. In: M. Novaes, & N. Studart (Orgs.). *Mecânica Quântica Básica* (pp. 25-41). São Paulo, SP: Livraria da Física.
- Oliveira, D. Q., & Gonçalves, F. P. (2019). Usina: articulações entre ensino, literatura e interações entre ciência, tecnologia e sociedade. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, 21(1). <https://doi.org/10.1590/1983-21172019210113>
- Paulo, I. J. C. de, & Moreira, M. A. (2011). O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio. *Ciência & Educação (Bauru)*, 17(2), 421-434. <https://doi.org/10.1590/S1516-73132011000200011>

- Peirce, C. S. (1894). O que é um signo? (tradução de Ana Maria Guimarães Jorge). *FACOM*, (18), 46-56. Recuperada de https://www.faap.br/revista_faap/revista_facom/facom_18/ana.pdf
- Piassi, L. P. de C. (2015). De Émile Zola a José Saramago: interfaces didáticas entre as ciências naturais e a literatura universal. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 15(1), 33-37. Recuperada de <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/download/4301/2866/13504>
- Ramos, J. E. F., & Piassi, L. P. de C. (2017). O insólito e a física moderna: interfaces didáticas do conto fantástico. *Ciência & Educação (Bauru)*, 23(1), 163-180. <https://doi.org/10.1590/1516-731320170010010>
- Schneider, J. F., & Valle, E. R. M. (1995). O indivíduo denominado esquizofrênico – análise ideográfica. *Revista Brasileira de Enfermagem*, 48(3), 286-296. <https://doi.org/10.1590/S0034-71671995000300010>
- Simões, D. (2007). *Iconicidade e verossimilhança*. Rio de Janeiro, RJ: Dialogarts.
- Simões, D. (2009). *Iconicidade Verbal. Teoria e Prática*. Rio de Janeiro RJ: Dialogarts.
- Simões, D. (2004). Semiótica e alternativas metodológicas para a leitura e produção de textos. In D. Simões (Org.). *Estudos Semióticos. Papéis Avulsos* (pp. 126-141). Rio de Janeiro, RJ: Dialogarts.
- Silva, L. C. M. da., Santos, W. M. S., & Dias, P. M. C. (2011). A carga específica do elétron. Um enfoque histórico e experimental. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 33(1), 1601-1-7. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100023>
- Souza, A. R. de., & Neves, L. A. dos S. (2016). O livro paradidático no ensino de Física - uma análise fabular, científica e metafórica da obra Alice no País do Quantum: A Física Quântica ao alcance de todos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(3), 1145-1160. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2016v33n3p1145>
- Snow, C. P. (1995). *As Duas Culturas e uma segunda leitura*. São Paulo, SP: Edusp.
- Valério, T. A. M., & Lyra, M. C. D. P. (2014). A construção cultural de significados sobre adoção: um processo semiótico. *Psicologia & Sociedade*, 26(3), 716-725. <https://doi.org/10.1590/S0102-71822014000300020>
- Valsiner, J. (2014). *An Invitation to Cultural Psychology*. London, England: Sage.
- Valsiner, J. (2012). *Fundamentos da Psicologia Cultural – Mundos da Mente, Mundos da Vida*. Porto Alegre, RS: Artmed.
- Valsiner, J. (2007). Personal culture and conduct of value. *Journal of Social, Evolutionary, and Cultural Psychology*, 1(2), 59-65. <https://doi.org/10.1037/h0099358>

Recebido em: 25.09.2023

Aceito em: 02.04.2024