

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO

Afonso Werner da Rosa

SOBRE A RECIPROCIDADE ENTRE ENSINAR E  
PESQUISAR: UMA ANÁLISE  
METALINGUÍSTICA DO LIVRO QUANTUM  
THEORY DE DAVID BOHM

Passo Fundo

2022

Afonso Werner da Rosa

SOBRE A RECIPROCIDADE ENTRE ENSINAR E  
PESQUISAR: UMA ANÁLISE  
METALINGUÍSTICA DO LIVRO *QUANTUM  
THEORY* DE DAVID BOHM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Educação sob a orientação do Prof. Dr. Claudio Almir Dalbosco e coorientação do Prof. Dr. Nathan Willig Lima.

Passo Fundo

2022

CIP – Catalogação na Publicação

---

R788s Rosa, Afonso Werner da

Sobre a reciprocidade entre ensinar e pesquisar [recurso eletrônico] : uma análise metalinguística do livro *Quantum theory* de David Bohm / Afonso Werner da Rosa. – 2022.

138 Kb. ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Almir Dalbosco.

Coorientador: Prof. Dr. Nathan Willig Lima.

Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade de Passo Fundo, 2022.

1. Conscientização da linguagem. 2. Física – Estudo e ensino. 3. Bohm, David, 1917-1992. 4. Teoria quântica na literatura. 5. Ciências – Pesquisa. I. Dalbosco, Claudio Almir, orientador. II. Lima, Nathan Willig, coorientador. III. Título.

CDU: 372.853

---

Catalogação: Bibliotecária Schirlei T. da S. Vaz - CRB 10/1364

Afonso Werner da Rosa

**SOBRE A RECIPROCIDADE ENTRE ENSINAR E PESQUISAR: UMA  
ANÁLISE METALINGUÍSTICA DO LIVRO QUANTUM THEORY DE  
DAVID BOHM**

Aprovada em 12 de maio de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

Dr. Claudio Almir Dalbosco – Orientador (UPF)

Dr. Nathan Willig Lima – Coorientador (UFRGS)

Dr. Olival Freire Jr. – Examinador externo (UFBA)

Dr. Eldon Henrique Mühl – Examinador interno (UPF)

Dr. Angelo Vitório Cenci – Examinador interno (UPF)



**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação**

**“Sobre a reciprocidade entre ensinar e pesquisar: uma análise metalinguística do livro *Quantum Theory* de David Bohm”**

Elaborada por

**AFONSO WERNER DA ROSA**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Educação, da Faculdade de Educação, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial e final para a obtenção do grau de Mestre em Educação

Aprovada em: 12 de maio de 2022  
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Claudio Almir Dalbosco  
Universidade de Passo Fundo  
Orientador

Prof. Dr. Nathan Willig Lima  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Coorientador

Prof. Dr. Olival Freire Junior  
Universidade Federal da Bahia  
Membro Externo

Prof. Dr. Eldon Henrique Muhl  
Universidade de Passo Fundo  
Membro Interno

Prof. Dr. Angelo Vitória Cenci  
Universidade de Passo Fundo  
Membro Interno

Prof. Dr. Altair Alberto Fávero  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Educação

*Depois, antes de nada mais,  
A metafísica enfrentais,  
Para apreenderdes, perspicaz, de plano  
O que é alheio ao cérebro humano.  
Para o que se lhe integra e o que não se lhe integra,  
Uma ótima palavra ocorre, em regra.  
Mas, tratai de zelar pela ordem com afinco  
Neste semestre que inicia o ensino.  
São, diariamente, as aulas cinco;  
Cuidai de entrar com o som do sino!  
De antemão preparado, pronto,  
A olhar que nada ensinem em excesso  
Do que no livro se acha impresso;  
À escrita dedicai-vos, entretanto,  
Como se vos ditasse o Espírito Santo.*

**Johann Wolfgang von Goethe**

(Fausto, 2004, p. 189)

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha família, Cleci, Álvaro e Érika, por possibilitarem o Ser que sou hoje. Acredito que a vida com três pessoas tão distintas, cada uma com sua forma de pensar e interpretar a realidade, foi o que despertou em mim o desejo pelo conhecimento.

Agradeço à minha companheira Amanda por aceitar dividir a vida comigo, por me ensinar a apreciar a serenidade e a franqueza, sempre me fazendo refletir ao demonstrar sua forma de interpretar o mundo, até mesmo nas mais triviais das conversas.

Aos meus familiares, agradeço pela compreensão e pelo carinho que tem por mim, peço que me perdoem pela ausência, mas, também, saibam que são de fundamental importância na constituição de quem sou hoje.

Aos meus amigos próximos, agradeço por sempre me ouvirem criticar e argumentar sobre tudo o que estiver ao meu alcance.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Claudio Dalbosco, por aceitar me orientar em uma temática tão desafiadora, suas considerações foram de crucial importância não só para o trabalho, mas também para o meu próprio processo formativo.

Agradeço ao meu coorientador, professor Dr. Nathan Lima, pela amizade, parceria, e por me guiar no mundo do conhecimento.

Estimados Claudio e Nathan, obrigado por me inspirarem, cada um em sua medida, a seguir nesta eterna caminhada em busca do saber. Foram excelentes mestres ao me conduzir nesta breve jornada.

Estendo os agradecimentos as contribuições dadas ao trabalho pelos membros da Banca no exame de qualificação.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Educação da Universidade de Passo Fundo pela oportunidade de aprender e a Capes pelo apoio financeiro para realização do mestrado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram com a minha jornada, não poderia ser quem sou hoje se não fosse por todos vocês.

## Resumo

David Joseph Bohm foi um físico norte-americano responsável por trabalhos relacionados à Física Teórica, Fundamentos da Mecânica Quântica e, até mesmo, à relação entre o conhecimento humano e a natureza. No presente trabalho desenvolvemos uma análise metalinguística sobre o enunciado didático de David Bohm para a Teoria Quântica expresso por meio do livro didático *Quantum Theory* (1951), elaborado a partir da experiência docente desenvolvida pelo autor ao longo da década de 1940. Para a análise metalinguística, nos apoiamos na Filosofia da Linguagem de Mikhail Bakhtin e, a partir disso, identificamos os elementos discursivos e epistêmicos que permeiam o enunciado de Bohm. Por fim, frente às características identificadas, discutimos a relação entre ensinar e pesquisar ciências. Buscamos, desse modo, caracterizar a reciprocidade como aspecto nuclear da dimensão pedagógico-formativa implicada em tal relação.

**Palavras-chave:** David Bohm. Análise Metalinguística. Teoria Quântica. Ensinar e Pesquisar.



### **Abstract**

David Joseph Bohm was an US physicist responsible for works related to Theoretical Physics, Fundamentals of Quantum Mechanics and the relationship between human knowledge and Nature. In the present work we develop a metalinguistic analysis on Bohm's didactic utterance to Quantum Theory expressed through his textbook *Quantum Theory* (1951), elaborated from his teaching experience during the 1940s. For the metalinguistic analysis, we rely on Mikhail Bakhtin's Philosophy of Language and identify the discursive and epistemic elements that permeate Bohm's utterance. Finally, from the identified characteristics, we problematize the relationship between teaching and researching science, characterizing its core reciprocity of its pedagogical-formative dimension.

**Key-words:** David Bohm. Metalinguistic analysis. Quantum Theory. Teaching and Researching.

**LISTA DE SIGLAS**

FC – Física Clássica

FQ – Física Quântica

LD – Livro didático

MQ – Mecânica Quântica

TQ – Teoria Quântica

TRG – Teoria da Relatividade Geral

TRR – Teoria da Relatividade Restrita

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 A FILOSOFIA DA LINGUAGEM DE MIKHAIL BAKHTIN	22
2.1 O círculo de Bakhtin	22
2.2 O ato e a totalidade da vida	26
2.3 Enunciado concreto e gênero do discurso	34
2.4 A proposta analítica para o enunciado concreto	38
3 DAVID BOHM E A TEORIA QUÂNTICA	42
3.1 A Física do século XX e o surgimento da Teoria Quântica	42
3.2 Aspectos biográficos de David Bohm	47
4 ANÁLISE DO ENUNCIADO DIDÁTICO DE BOHM NO LIVRO QUANTUM THEORY	57
4.1 Descrição geral do enunciado	57
4.2 Características discursivas e epistêmicas do enunciado didático	68
4.2.1 Estilo: construção e justificação dos conceitos	68
4.2.2 Estrutura composicional: alternância entre o concreto e o abstrato	71
4.2.3 Vozes subjacentes: Complementaridade e Realismo	73
4.2.4 Tema: fundamentos e limites da Física	76
5 O LIVRO DIDÁTICO E A RECIPROCIDADE ENTRE ENSINAR E PESQUISAR	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS	93

## 1 INTRODUÇÃO

Comumente, quando pensamos na relação entre ciência e pedagogia, somos levados a concebê-la a partir de uma “imagem clássica da ciência”, expressão cunhada por Renn e Hyman (2012). Para os autores, tal imagem é a que estabelece critérios de distinção entre ciência básica e ciência aplicada, entre a atividade pedagógica educacional e a pesquisa científica. Badino e Navarro (2017) argumentam que essa imagem nos leva a conceber o conhecimento produzido dentro de uma cultura científica como sendo radicalmente diferente das suas disseminações nos demais campos sociais. Além disso, essa imagem clássica cria uma estética da comunidade científica na qual ela é composta por uma estrutura extremamente organizada, regida por uma elite de experts que produzem e validam o corpo de conhecimentos que, posteriormente, são transmitidos para o restante da sociedade. Nessa perspectiva, o conhecimento produzido dentro do gênero científico é visto como inalcançável na sua forma completa para o público em geral, sendo necessária uma reelaboração desse conhecimento a partir do gênero didático (BADINO; NAVARRO, 2017).

A tradicional relação entre o ensino e a pesquisa em ciências pode ser inicialmente entendida a partir dos trabalhos de Thomas Kuhn. Em *A Estrutura das Revoluções Científicas* (2017), Kuhn argumenta que a ciência progride a partir de períodos de ciência normal e de revoluções científicas. Em suma, a usual atividade científica ocorre sob o véu de um paradigma comum, um conjunto de suposições e hipóteses compartilhadas pelos cientistas. Disso decorre o que Kuhn denomina de ciência normal. Isto é, no período de ciência normal, a atividade científica desenvolve-se frente ao paradigma científico dominante, estendendo-o à maior gama de fenômenos e situações possíveis em busca de eventuais anomalias em seus princípios fundamentais. A partir do momento em que são identificadas anomalias suficientes, ou anomalias que tornem o paradigma insustentável, a ciência passa pelo período que Kuhn denomina de revolução científica. Então, frente às anomalias identificadas, busca-se por formular novas teorias e abordagens que visem dar conta dos novos fenômenos. Após seu surgimento, uma nova ideia passa por um período de amadurecimento até que possa se estabelecer como ciência e assim assumir a posição de paradigma dominante, dando início a um novo período de ciência normal.

Tendo em vista tal descrição quanto ao proceder histórico das teorias científicas, Kuhn argumenta que a formação tradicional do cientista se dá a partir de um regime de adestramento. Ou seja, em sua formação, o futuro cientista é treinado para a reprodução do paradigma vigente. Para tanto, ele é exposto às concepções, hipóteses e suposições do paradigma vigente, à

resolução de usuais problemas desse paradigma e às suas aplicações para situações semelhantes. Em suma, a formação do cientista ocorre mediante um treinamento para a reprodução da ciência normal, assim, instruindo o futuro cientista para que este seja capaz de, futuramente ao amadurecer, identificar possíveis anomalias no paradigma vigente.

Em um primeiro momento, a concepção de Kuhn referente à sua noção de formação pode parecer um tanto quanto reducionista, contudo, o próprio autor destaca o papel central da educação científica no desenvolvimento da ciência. Em primeiro lugar, é preciso compreender que a visão de Kuhn é fortemente influenciada pela sua formação profissional. Sendo formado físico, antes de se dedicar à Filosofia da Ciência, ele desenvolvia suas pesquisas como físico teórico. De sua formação como físico, junto de seus anos de trabalho, Kuhn passa pelo mesmo regime de treinamento que descreve, resolvendo problemas e estendendo-os a partir do paradigma vigente à época. Para o autor, esse treinamento é necessário para que o futuro cientista seja capaz de, no futuro, identificar as anomalias no paradigma ao qual foi adestrado. Contudo, ele ressalta que a estrutura do conhecimento científico apresentada nesses regimes, em especial a partir dos livros didáticos (LD), acaba por ocultar o potencial criativo da ciência.

A partir dessa estrutura kuhniana, Kaiser e Warwick (2005) questionam quanto tempo é necessário para que um paradigma apresentado por uma teoria se torne uma visão hegemônica. Eles afirmam que, enquanto as noções de Copérnico levaram cerca de um século para se tornarem hegemônicas, as de Einstein foram rapidamente adotadas por um grande grupo de cientistas cerca de cinco anos após seu surgimento. Essa diferença pode ser explicada, segundo os autores, a partir da análise dos processos de treinamento institucionalizado. Ou seja, sugerem que o avanço nos meios de treinamento nas instituições de ensino foi o responsável pela rápida aceitação do novo paradigma. Diante disso, pode-se traçar um paralelo entre as noções de Kuhn quanto ao proceder histórico da ciência e as de M. Foucault quanto aos regimes de treinamento institucionalizados. Kaiser (2005, p. 1) ainda afirma que “cientistas não nascem, eles são feitos”, já indicando a centralidade dos processos de treinamento.

Kaiser e Warwick (2005), ao investigar a relação entre pedagogia e a prática científica, apontam que há aspectos complementares entre os trabalhos de Kuhn e de Foucault. Enquanto o primeiro foca no produto dos regimes de treinamento, o segundo foca no processo. Assim, o aspecto vinculante entre os autores são a atenção dada à complexidade e o poder produtivo dos regimes de treinamento. No entanto, Kaiser e Warwick (2005, p. 402) pontuam que a abordagem de Kuhn sobre a pedagogia é limitada aos livros didáticos e aos conteúdos gerais tratados pela educação científica, ao passo que a de Foucault evoca “um nexos muito mais rico

e interativo de olhares, corpos, gestos, arquiteturas, rotinas, incitações, exames e punições institucionalizados”. Os autores desenvolvem sua argumentação a partir de dois pontos:

Primeiro, observando a compatibilidade da ênfase de Kuhn na aquisição de habilidades com a visão de Foucault de que o poder é a forma das relações sociais não inibe ou oculta o conhecimento, mas é necessário à sua produção; e, segundo, a partir da afirmação de Foucault de que as minúcias das práticas cotidianas têm o poder de gerar novas capacidades nos seres humanos, provocando mudanças históricas significativas (KAISER; WARWICK, 2005, p. 406).

A relação traçada por Kaiser e Warwick (2005) entre Kuhn e Foucault também é abordada por Badino e Navarro (2017, p. 9), os quais ponderam que: “Essa tentativa de juntar o melhor de dois mundos nos aponta para perspectivas muito interessantes, mas ainda contém algumas dificuldades fundamentais”. Os autores afirmam que é pertinente a identificação das similaridades entre a noção de ciência normal baseada em paradigmas de Kuhn e a de Foucault quanto aos regimes de treinamento e normalização confinados a técnicas de disciplinarização. No entanto, argumentam que a questão de como se dá a produção de novos conhecimentos nesses regimes de treinamento ainda é um ponto em aberto, sugerindo que essa pedagogia “foukuhniana” destina pouco espaço para a criatividade individual.

A forte ênfase que Kuhn e Foucault colocam na unilateralidade da relação pedagógica entre mestre e aluno torna difícil explicar como o treinamento pode transformar um aluno dócil e obediente em um pesquisador independente capaz, em algum momento, de matar metaforicamente sua/seu mestre, ou seja, desafiar o próprio paradigma (BADINO; NAVARRO, 2017, p. 9).

Os autores retomam Suman Seth e sugerem que a disciplina não produz pessoas capazes de produzir novos conhecimentos e, ainda, que é essa produção de novos conhecimentos que diferencia o pesquisador do estudante. Badino e Navarro argumentam que a ousada combinação entre Kuhn e Foucault parece, por vezes, tratar a posição dos autores de forma muito ampla e sutil. Uma importante diferença entre os autores, segundo Badino e Navarro, é que Foucault busca caracterizar uma dimensão interpretativa entre os mecanismos microscópicos e macroscópicos da sociedade; já Kuhn não menciona tal questão. Assim, indicam que não se deve subestimar as diferenças entre os dois autores.

Badino e Navarro apontam que a proposta de Kaiser e Warwick de uma pedagogia “foukuhniana” necessita ser complementada por futuros desenvolvimentos, os quais devem ser derivados da investigação frente à questão do conhecimento na dualidade poder/conhecimento de Foucault. Os autores destacam dois importantes pontos necessários à investigação. O

primeiro é que os livros didáticos devem se tornar legítimos instrumentos historiográficos, tanto para a história das práticas pedagógicas quanto para a história da ciência. O segundo é que Kuhn e Foucault focam na centralidade das práticas pedagógicas em períodos de estabilidade e ciência normal, enquanto Badino e Navarro argumentam que é preciso buscar compreender o que acontece em períodos de mudanças no paradigma científico.

Em períodos de ciência normal, a autoridade do livro didático caracteriza-se a partir da noção de que este contém a verdade quanto ao conhecimento. Kuhn já indica isso ao afirmar que os livros didáticos são tidos como repositórios de verdades frente ao paradigma dominante, passando por reelaborações e redefinições na estrutura do conhecimento apresentado. Disso pode-se traçar uma relação com a dualidade poder/conhecimento em Foucault (1980, p. 93): “Estamos sujeitos à produção da verdade pelo poder e não podemos exercer o poder senão pela produção da verdade”. Assim, o período de ciência normal desenvolve-se no ensino de ciências, em partes, a partir do poder exercido pelos livros didáticos por meio da produção de verdades.

Simon (2016) afirma que o termo *textbook* (livro didático) emerge como gênero entre os séculos XIX e XX, representando um livro concebido para propósitos institucionais em contextos de educação formal. O autor afirma que as principais características de um livro didático são o seu uso no ensino/aprendizagem e sua autoridade, o poder que exerce. “A autoridade dos livros didáticos é construída sobre seu papel central no ensino. Vice-versa, a seleção de certos livros como livros didáticos é frequentemente baseada em sua autoridade” (SIMON, 2016, p. 404). Ainda, aponta que diferentes fontes podem proporcionar autoridade a um livro didático. Entre elas, menciona o uso extensivo de determinado livro; a aprovação que lhe é dada pela autoridade de alguma instituição política, científica ou educacional; o marketing desenvolvido pelo publicante e/ou a reputação do autor.

Mesmo com tal centralidade e autoridade, da noção de que se trata de instrumento reprodutor da ciência normal decorre uma imagem do livro didático como sendo inferior aos demais escritos científicos na cadeia de comunicação da ciência, considerado como a última das preocupações de um cientista. Por serem vistos dessa forma, os LD acabam por se distanciar do “entusiasmo criativo”, da construção de fatos e de demais elementos da prática científica (GARCÍA-BELMAR; BERTOMEU-SÁNCHEZ; BENSUADE-VINCENT, 2005). Segundo os autores, a ciência criativa é a que produz novos saberes, pois é a partir dela que surgem ideias revolucionárias; em oposição, a ciência expositiva reproduz os saberes já formulados – retornando à usual distinção entre atividade científica e ensino de ciências já mencionada.

Dessa forma, reforça-se a noção de livro didático como produto menor da atividade científica, responsável apenas pela reprodução do conhecimento científico e não por sua dimensão criativa. Tal visão alinha-se com o descrito por Kuhn, o qual afirma que a estrutura do conhecimento presente nos livros didáticos tende a esconder a criatividade científica. Como já indicado, Kuhn concebe os livros didáticos como instrumentos úteis apenas em regimes de treinamento, contendo um repositório de verdades frente ao paradigma científico vigente. Frente a essa noção, Badino e Navarro (2017) argumentam que o livro didático passa a ser visto como agente passivo nos processos de revolução científica, uma vez que apenas reproduzem o paradigma vigente sem questioná-lo e buscar superá-lo.

No entanto, argumentam que as mudanças científicas podem estar presentes, também, nos livros didáticos formulados próximos a períodos de revolução científica:

Assim, se deslocarmos nossos holofotes dos dias tranquilos da ciência normal para o tumulto de uma crise que marcou época, percebemos que os livros didáticos deixam de ser o repositório neutro da verdade e entram em diálogo com a pesquisa ativa. Por meio desse diálogo, a pedagogia pode nos oferecer uma janela original sobre a produção e disseminação do conhecimento científico (BADINO; NAVARRO, 2017, p. 10).

Uma ideia revolucionária surge das fronteiras entre diferentes áreas do conhecimento científico, fruto de tensões internas que estas podem apresentar e da criatividade científica. Badino e Navarro (2017) argumentam que, pelo fato de surgir nas fronteiras entre diferentes áreas, a nova ideia acaba por não pertencer a nenhuma delas. De início, uma nova ideia encontra-se em um isolamento epistemológico. Para que se transforme em uma nova ciência, é necessário um longo processo de comparação entre a nova ideia e o corpo de conhecimentos já estabelecido. Relacionado a isso, indicam um importante papel exercido pelo livro didático no desenvolvimento da ciência.

Como os livros didáticos, por necessidade, põem em contato a tradição e as novas abordagens, eles exploram incansavelmente as potencialidades das ferramentas mais antigas e sua conexão com as mais novas. Esse processo, que Kuhn interpretou como ocultando os rastros de uma revolução, recapitula na realidade a essência do processo de pesquisa (BADINO; NAVARRO, 2017, p. 12).

Os autores destacam que é sobre o complexo processo de inclusão, exclusão e reconfiguração na combinação de elementos do conhecimento que a investigação acerca dos livros didáticos pode prover insights esclarecedores. Ainda, destacam que tal processo é típico da pesquisa científica. Como já mencionado, Badino e Navarro centram suas investigações,



assim como as demais apresentadas na obra editada pelos autores, nos livros didáticos escritos próximos a períodos de instabilidade e revolução científica – no caso dos livros analisados na obra, próximos ao surgimento da Mecânica Quântica (MQ).

Ao pensarmos nos livros didáticos discutidos por Badino e Navarro (2017), vemos que esses materiais podem ir além do usual apanhado teórico, ou mesmo da contextualização excessiva, sendo um reflexo da organização mental do cientista expressa por meio do livro. Segundo os autores, os historiadores da ciência devem olhar para os livros didáticos como “[...] não apenas produtos de uma mudança científica, úteis apenas como ferramentas em regimes de treinamento, mas também como agentes ativos no processo criativo de desenvolvimento científico” (BADINO; NAVARRO, 2017, p. 10). Tais autores buscam retomar o caráter formativo do LD, e não apenas o instrumental, argumentando que ele não é um mero produto de uma revolução científica, mas, sim, agente ativo nesse processo revolucionário, e complementam ponderando que: “Um novo paradigma não aparece da noite para o dia, e livros didáticos não aparecem apenas nos estágios finais da mudança científica”.

Dessa forma, pode-se identificar livros didáticos nos quais estão presentes verdadeiras expressões da atividade científica, seu caráter criativo, e não apenas seus resultados e conclusões. Nesse sentido, neste trabalho, buscamos dar continuidade aos estudos de Badino e Navarro (2017) a partir da investigação do livro didático *Quantum Theory* (1951), de David Bohm. No entanto, o enfoque e a abordagem são distintos das adotadas pelos autores da obra editada por Badino e Navarro (2017). As similaridades dão-se na medida em que investigamos um livro didático escrito por um cientista visando discorrer sobre os processos relacionados à atividade científica presentes nele. Porém, enquanto os autores centram as investigações em livros escritos em períodos de revolução científica, o livro de David Bohm pode ser considerado, em princípio, como escrito em relação a um paradigma já estabelecido<sup>1</sup>.

Outro elemento que diferencia a presente investigação dos estudos apresentados por Badino e Navarro (2017) é que, enquanto os autores discorrem sobre a relação entre pedagogia e pesquisa tendo em vista a pedagogia “foukuhniana”, aqui buscamos, de maneira mais geral, partir da análise do livro de Bohm para discorrer/refletir sobre uma possível reciprocidade entre ensinar e pesquisar. Para desenvolvermos essa reflexão final, apoiamo-nos em uma Análise Metalinguística no livro didático de Bohm, na qual identificamos os elementos discursivos e epistêmicos nele encontrados, que serão discutidos no capítulo 4. No capítulo final, onde

---

<sup>1</sup> Uma discussão mais aprofundada sobre essa identificação é apresentada no capítulo final do presente trabalho.

traçamos tal reflexão, apresentamos uma breve discussão relacionando os resultados da análise com alguns dos elementos indicados por Badino e Navarro (2017).

A Análise Metalinguística é desenvolvida tomando como referencial a Filosofia da Linguagem de Mikhail Bakhtin (2016). A partir da concepção bakhtiniana de ato responsável, que será discutida no segundo capítulo, podemos identificar a ação humana como algo que, simultaneamente, responde a um mundo de abstrações teóricas e a um mundo de experiência viva. Bakhtin (2010) define esse mundo de abstrações teóricas como “mundo da cultura”, composto por unidades teóricas de conteúdo-sentido e alheio à experiência viva particular. Por outro lado, o mundo da experiência viva, denominado “mundo da vida”, é composto pela nossa experiência “viva e vivente”, nossa experiência concreta no mundo real. O elo entre esses dois mundos, aparentemente distintos, é a ação responsável, vista como uma unidade dialética, pois é ela que faz surgir o dever de se responder às unidades teóricas do mundo da cultura e a ao contexto sócio-histórico no qual estamos inseridos. Assim, esses dois mundos não podem ser separados a ponto de se tornarem impenetráveis, visto que em cada ato o sujeito responde, simultaneamente, a ambos, fazendo com que a cultura entre na vida e a vida entre na cultura. Essa fusão entre cultura e vida no existir-evento do ato justifica-se na medida em que concebemos os objetos do mundo da cultura como constituídos a partir da constante ação humana no passar do tempo (definições, teorizações, inter-relações entre teorias, etc.), e, ainda, porque a ação humana no mundo real é modelada por padrões presentes nesse outro mundo.

Ao transpormos a ação responsável para o conceito de enunciado, podemos observar que um enunciado sempre faz referência a enunciados anteriores e, simultaneamente, ao campo de ação social no qual ele é constituído. Com isso, todo enunciado é a expressão de uma resposta, dentre todas as possíveis, elaborada a determinada unidade teórica. A escolha de uma resposta em detrimento de outra, junto do tom emotivo atribuído a ela, expressa a atitude avaliativa do sujeito que enuncia frente ao conteúdo-sentido enunciado. Essa avaliação é feita a partir da experiência vivida pelo sujeito, sua historicidade, e, com isso, leva elementos de demais unidades teóricas já respondidas no curso de sua vida. O que pretendemos analisar à luz disso é a inter-relação entre diferentes elementos do mundo da cultura na constituição de enunciados didáticos e científicos elaborados por David Bohm.

David Bohm foi um físico estadunidense responsável por elaborar uma interpretação causal para a Mecânica Quântica em termos de variáveis ocultas, além de significativas contribuições para o estudo do plasma e da eletrodinâmica quântica. A formulação de Bohm para uma interpretação causal da MQ constitui um marco para o desenvolvimento da teoria e

sua posterior extensão. Ao ser formulada, a Mecânica Quântica é interpretada a partir de uma dimensão empírico-lógica, fortemente influenciada pelas concepções de Heisenberg, Bohr e Born, o que posteriormente ficou conhecido como interpretação de Copenhague, uma interpretação instrumentalista embasada em evidências empíricas e deduções lógicas. Ao elaborar sua interpretação alternativa, Bohm retoma parte do realismo perdido pela interpretação usual, possibilitando que a teoria vá além dos limites por ela impostos, demonstrando que as predições de sua nova formulação levam aos mesmos resultados experimentais obtidos pela sua concepção usual.

Contudo, antes de formular sua interpretação causal para a MQ em termos de variáveis ocultas, Bohm elabora um livro didático para a Teoria Quântica (TQ) (1951) no qual a apresenta a partir da noção de complementaridade bohriana. Na obra, ele leva a interpretação usual da teoria aos seus limites, demonstrando problemas ainda não resolvidos e indicando sua possível solução a partir de diferentes concepções, contudo, ao final, mantém sua defesa à noção de complementaridade. Um ano após o livro contendo a formulação didática para a TQ a partir da noção de complementaridade, Bohm publica seus dois artigos relacionados à interpretação causal da MQ, nos quais rompe com as noções da interpretação usual, anteriormente defendidas. Assim, ao olharmos para esses dois enunciados elaborados pelo autor, notamos que, em um primeiro momento, ele formula um enunciado didático visando defender e difundir a interpretação usual, estruturando toda a TQ em termos dessa concepção, e, posteriormente, formula seu enunciado científico com vistas a romper com tal visão, estruturando a MQ em termos realistas e causais.

Podemos observar que a atividade científica trouxe para Bohm algumas implicações para com a Teoria Quântica em sua forma usual, que, junto de sua atividade pedagógica, fez surgir a necessidade de se interpretar a MQ visando recuperar conceitos como determinismo e causalidade, abandonados durante o desenvolvimento da teoria. Dessa forma, a atividade pedagógica e a científica estão intrinsecamente ligadas em David Bohm. Tanto os enunciados científicos de Bohm quanto os didáticos levam em si as inquietações de um cientista, os problemas que nem mesmo ele, dotado de sua “autoridade científica”, era capaz de resolver com clareza, sempre indicando um caminho para futuras investigações. Nessa perspectiva, em seus enunciados didáticos, Bohm não apresenta apenas os produtos dos esforços científicos, mas também os problemas ainda não resolvidos da ciência a partir das diferentes rotas argumentativas. Por isso, em seu livro didático, não distingue abruptamente a atividade

científica da pedagogia, trazendo uma série de elementos característicos da primeira para a segunda.

As atividades científica e pedagógica podem ser entendidas como elementos intrínsecos ao desenvolvimento do conhecimento. Nesse sentido, as entendemos a partir dos gêneros do discurso de Bakhtin, isto é, como enunciados feitos em contextos didático-formativos e de pesquisas científicas. Em geral, a estrutura dos enunciados formulados em meio ao gênero das pesquisas científicas pode ser identificada pela estrutura dos artigos científicos, ou seja, introdução, fundamentação teórica, metodologia, coleta de dados, análise, discussão, conclusão e referências. A temática do enunciado deve abranger tópicos contemporâneos de pesquisas, seu estilo referenciando demais trabalhos já publicados de forma argumentativa. O objetivo de um enunciado como este é, em suma, a produção do conhecimento, não tendo a intenção direta de favorecer os processos de ensino e aprendizagem em contextos educacionais. Disso surge a noção de didática como um tradutor dessa atividade científica, muitas vezes reduzindo sua dimensão formativa em prol de uma estrutura estática do conhecimento instrumentalizado.

Olhando para enunciados formulados em meio ao gênero dos livros didáticos, observamos que o que os caracteriza como tais é seu uso em contextos de ensino e aprendizagem. Como argumentamos anteriormente, a caracterização de um LD dá-se, historicamente, pelo seu uso na educação formal e por sua autoridade pedagógica e científica em ambientes educacionais (SIMON, 2016). Assim, no caso dos livros didáticos, a estrutura geral desses enunciados pode ser identificada como uma fragmentação dos saberes em tópicos mais específicos, facilitando o processo de ensino-aprendizagem, buscando se estabelecer como um estatuto geral de determinado tópico ou teoria. Em geral, a composição de um enunciado no gênero dos livros didáticos é voltada à potencialização da apropriação dos saberes em questão, esquematizando-os de forma simplificada e de fácil compreensão. Contudo, como pretendemos argumentar no presente trabalho, ambos os gêneros são interligados por um caráter formativo, seja do cientista em sua busca pelo saber, seja do estudante em seu processo de aprendizagem. É frente a essa hipótese inicial que analisamos o enunciado didático de Bohm e buscamos identificar as características que nos indicam essa reciprocidade entre o caráter formativo da pesquisa e do ensino.

A partir dessa primeira aproximação, podemos identificar que a influência entre os gêneros científico e didático nos trabalhos de Bohm possui uma direção dupla. Isto é, por um lado, a apresentação didática da Teoria Quântica a partir da concepção hegemônica (interpretação de Copenhague) em seu livro didático (1951) permitiu que Bohm identificasse

as lacunas a serem superadas na construção de uma teoria coerente – o que daria origem à sua teoria das variáveis ocultas (1952a; 1952b). Por outro lado, a postura científica de Bohm e as incoerências que ele observava durante suas atividades tiveram impacto na sua prática pedagógica, fazendo-o levar para a docência não apenas os resultados produzidos pela comunidade científica, mas também o caráter argumentativo e investigativo exigido por ela – o que difere consideravelmente da estrutura composicional dos livros de Física Quântica (FQ) contemporâneos.

Dito isso, o objetivo deste trabalho é analisar os elementos discursivos presentes no enunciado didático de Bohm sobre a TQ (BOHM, 1951) à luz da Filosofia da Linguagem do círculo de Bakhtin, visando identificar as possíveis influências da atividade pedagógica na prática científica do autor e vice-versa. Buscamos, assim, compreender em que medida sua prática científica impactou a escrita do livro didático, bem como de que forma a elaboração do livro didático pode ter contribuído para que Bohm formulasse sua interpretação alternativa para a MQ. Ou seja, como se pode observar, no centro da investigação está a proximidade entre gênero científico e gênero didático: em que ambos consistem e quais são as possibilidades de diálogo entre eles, e, nesse sentido, quais seriam seus aspectos vinculantes? Nossa hipótese, nesse contexto, é de que há uma dimensão formativa tanto no processo de investigação científica como no processo de ensino da ciência que mostra a necessária reciprocidade entre ambos, contradizendo com isso a falsa dicotomia entre pesquisa e ensino.

Para que possamos traçar tal reflexão, no capítulo 2, adentramos na concepção filosófica do círculo de Bakhtin e apresentamos a trajetória analítica desta pesquisa. A partir disso encontramos subsídios teóricos para uma análise metalinguística do enunciado didático de Bohm, focando nos elementos que constituem e caracterizam tanto um enunciado quanto um gênero do discurso. Seguindo, no capítulo 3, procedemos a uma reconstrução dos aspectos biográficos de David Bohm e do contexto histórico do surgimento da Teoria Quântica, a fim de fornecer os elementos extraverbais presentes no enunciado do autor para essa teoria, isto é, os aspectos da vida de Bohm e do conteúdo discutido por ele em seu enunciado. O capítulo 4 é destinado a uma análise do enunciado didático de Bohm no livro *Quantum Theory* (1951), visando identificar suas características discursivas e epistêmicas. Nessa análise, identificamos em especial a temática, o estilo, a estrutura composicional e vozes subjacentes do enunciado. Por fim, no capítulo 5 traçamos uma reflexão acerca dos resultados da análise, na qual buscamos indicar uma possível reciprocidade entre o pesquisar e o ensinar ciências a partir de três teses centrais que serão discutidas nessa seção final.

## 2 A FILOSOFIA DA LINGUAGEM DE MIKHAIL BAKHTIN

Neste capítulo apresentamos alguns aspectos da filosofia da linguagem de Mikhail Bakhtin. Para tanto, começamos por introduzir o círculo de Bakhtin e suas filiações com as demais correntes filosóficas, assim como seu rompimento com algumas importantes tradições da filosofia. A partir disso, discutimos a noção de ação responsável em Bakhtin e seu papel na teoria comunicativa por ele elaborada. Na sequência, adentramos nas noções de enunciado e gênero do discurso, além de outros conceitos fundamentais de sua teoria comunicativa. Por fim, apresentamos a proposta de análise para os enunciados concretos e a trajetória analítica a ser percorrida nos próximos capítulos do trabalho.

### 2.1 O círculo de Bakhtin

Na primeira metade do século XX, em meio à recém-formada União Soviética, temos o desenvolvimento de um grupo de pensadores que hoje denominamos “círculo de Bakhtin”. Composto por Bakhtin, Voloshinov e Medvedev, o círculo visava tratar dos problemas da filosofia da linguagem em busca da elaboração de uma nova teoria comunicativa. Os estudos do círculo de Bakhtin têm como objeto de crítica o objetivismo abstrato, a partir das dicotomias saussurianas, e o subjetivismo idealista, de Humboldt e Vossler (LIMA et al., 2019). Bakhtin rompe com essas duas importantes correntes da filosofia da linguagem, opondo-se, ao mesmo tempo, à concepção saussuriana – segundo a qual a língua se impõe ao sujeito, resultando na retirada do sujeito do ato comunicativo – e, também, à concepção idealista – segundo a qual a língua é uma criação individual da psique humana, reduzindo o papel da influência social na sua construção.

Os escritos produzidos pelo círculo tiveram grande impacto nas investigações acerca da interação entre os sujeitos inseridos em campos de ação social. A autoria dos escritos, no entanto, é controversa. Yaguello (2002) argumenta que as obras *O freudismo: um espaço crítico* (VOLOSHINOV, 1987) e *Marxismo e filosofia da linguagem* (VOLOSHINOV, 1986) reúnem textos de autoria de Bakhtin que não foram assinados por ele. Para a autora, a recusa em assiná-los pode ter ocorrido por dois motivos: ou porque Bakhtin não aceitou as alterações sugeridas nos textos pelos editores, ao contrário de Voloshinov, que, por sua vez, as realizou e os publicou; ou por uma modéstia científica, isto é, Bakhtin buscava ser discreto e permanecer no anonimato, por isso evitava assinar seus trabalhos.

Lima et al. (2019), a partir de Morson e Emerson (2008), argumentam que Voloshinov e Medvedev não seriam apenas seguidores de Bakhtin, mas, sim, companheiros intelectuais e fortes influências do autor. Assim, independentemente da questão da autoria, podemos entender os escritos do círculo como um diálogo entre os três pensadores, expresso principalmente na voz de Bakhtin. De forma resumida, a concepção filosófica do círculo de Bakhtin pode ser assim descrita:

Em resumo, a concepção da filosofia da linguagem do Círculo, muito bem descrita na obra *Marxismo e Filosofia da Linguagem* (Voloshinov, 1986b), surge como síntese dialética após a rejeição das teses do subjetivismo idealista e do objetivismo abstrato. Para Bakhtin/Voloshinov (2006), o ato de fala, não pode ser considerado um ato individual explicado a partir de características psíquicas do sujeito, pois ele é de natureza social. Os autores destacam que a criatividade da língua não coincide com a criatividade artística como sugere o subjetivismo idealista, mas também não pode ser desvinculada de valores ideológicos como preconizado pelo objetivismo abstrato (LIMA et al., 2019, p. 261).

Para compreendermos melhor a concepção filosófica de Bakhtin, voltamos nossa atenção à obra *Para uma filosofia do ato* (BAKHTIN, 2010), possivelmente um de seus primeiros escritos, no qual ele se opõe à filosofia kantiana, em especial ao imperativo ético. “[...] Bakhtin se opõe ao imperativo ético de Kant e busca a reintegração do mundo objetivo da cultura e o mundo subjetivo das experiências do Ser. Em síntese, em *Para uma Filosofia do Ato*, Bakhtin busca reatar os polos ontológicos (objetivo-subjetivo) que Kant separou [...]” (LIMA et al., 2019, p. 262, dos autores). Assim, para compreendermos a filosofia bakhtiniana e, com isso, a crítica a Kant, precisamos partir de sua filosofia do ato responsável, que será apresentada detalhadamente na seção a seguir.

Em suma, Bakhtin busca romper com a separação kantiana entre subjetivo e objetivo, e, com isso, entre o mundo objetivo da cultura e o subjetivo da experiência do ser, na medida em que trata o ato a partir de uma dimensão ético-fenomenológica, isto é: “[...] uma unidade integral e singular, que acontece uma única vez no processo do Ser, mas que se dirige, ao mesmo tempo, ao mundo da vida e ao mundo da cultura. Por meio de cada ato, a cultura entra na vida e a vida entra na cultura” (LIMA et al., 2019, p. 262). Assim, o ato é o mínimo elemento de natureza dupla da ação humana, que responde a uma responsabilidade moral e a uma especial. Por conseguinte, um ato é composto pela sua natureza social, em relação ao mundo da cultura, e pessoal, em relação à sua história no ser.

O que constitui esse ato é, então, o eu e sua relação com o mundo. O ato não é fruto da pura vontade individual do sujeito, nem objetivamente determinado pelo contexto social; ele é

uma resposta dessa volição do eu à objetividade do mundo da cultura, constituído em um momento único e singular. Sobre essa formação do ato em Bakhtin, Lima et al. (2019, p. 264) escrevem:

A dupla responsabilidade de que Bakhtin fala (a moral e a especial) é o que caracteriza cada ato do Ser como sendo ao mesmo tempo único (singular) e, mesmo assim, socialmente estabelecido. Dessa forma, no centro da formação do ato não está um eu independente do mundo; mas um eu e a relação dele com o outro, com os outros, com a sociedade, com a cultura. É a alteridade que determina o ato e não uma subjetividade abstrata— o que Voloshinov (1986) chamou de orientação social do enunciado.

Dessa forma, o ato toma uma dimensão dialética para Bakhtin, sendo a menor unidade de ação humana. Grillo (2018), ao introduzir *Marxismo e filosofia da linguagem*, aponta que um dos seus tópicos centrais na relação entre a obra e seu contexto intelectual é a síntese dialética entre o idealismo neokantiano e a sociologia marxista. Voloshinov (2018) atribui essa dimensão dialética à formação do sentido linguístico da palavra como uma dialética interna do signo, na qual se tem a síntese dialética entre o psiquismo e a ideologia, isto é, entre a formação do signo na individualidade do ser e no contexto histórico-social.

A dialética na tradição marxista é caracterizada por três aspectos, centrais ao pensamento de Marx, a saber: (1) enquanto método científico, a dialética epistemológica; (2) enquanto leis ou princípios que governam a realidade, a dialética ontológica; e (3) enquanto movimento da história, a dialética relacional (BOTTOMORE, 2001). Ainda, identifica-se a distinção entre materialismo dialético, a filosofia do marxismo, e materialismo histórico, a ciência marxista. O objetivo da menção à dialética marxista é identificar parte da origem intelectual das ideias do círculo de Bakhtin e sua base filosófica; assim, centramos a discussão aqui presente na concepção de materialismo dialético.

As origens de tal concepção podem ser identificadas na primeira geração de marxistas pós-Marx, a qual, segundo suas próprias definições, “constitui-se pelo cruzamento e a união de duas ideologias burguesas: O MATERIALISMO mecanicista da Revolução Científica e do Iluminismo e a DIALÉTICA idealista de Hegel” (BOTTOMORE, 2001, p. 258, grifo dos autores). Essa combinação entre materialismo e dialética resulta em uma modificação em ambos. Retira-se o materialismo de seu seio reducionista originário, no qual se reduz ideias à matéria como forma final. O materialismo dialético sustenta que o material e o ideal, embora sejam opostos e diferentes, existem simultaneamente dentro de uma unidade na qual o material é o básico ou primordial. Assim temos a noção de conflito de contrários, a qual expressa o



avanço da realidade em um processo histórico de transformação progressiva e constante (BOTTOMORE, 2001).

Disso temos as leis fundamentais da dialética materialista:

(1) a lei da transformação da quantidade em qualidade, segundo a qual as mudanças quantitativas dão origem a mudanças qualitativas revolucionárias; (2) a lei da unidade dos contrários, que sustenta que a unidade da realidade concreta é uma unidade de contrários ou contradições; (3) a lei da NEGAÇÃO da negação, que pretende que, no conflito de contrários, um contrário nega o outro e é, por sua vez, negado por um nível superior de desenvolvimento histórico que preserva alguma coisa de ambos os termos negados (processo por vezes representado no esquema triádico de tese, antítese e síntese) (BOTTOMORE, 2001, p. 259, grifo dos autores).

Diante disso, identificamos o materialismo dialético como um importante aporte teórico para a compreensão da concepção filosófica do círculo de Bakhtin e de sua respectiva teoria comunicativa. A natureza dialética do ato em Bakhtin também se estende para a do enunciado, uma vez que este é entendido como a menor unidade de comunicação verbal, a expressão de uma síntese dialética da oposição entre vida e cultura. Dessa forma estreita-se a relação entre a concepção materialista dialética e os escritos do círculo de Bakhtin.

Ainda, Cardoso (2016), ao apresentar a concepção dialética nos escritos do círculo, elenca alguns elementos fundamentais do materialismo-dialético, a partir de Marx e Engels (2001), que podem ajudar a compreender essa dimensão do ato/enunciado. Dentre eles, temos a concepção totalizante da natureza, isto é, objetos e fenômenos são reciprocamente condicionados de maneira tal que a análise individual desses aspectos não pode levar a uma descrição da realidade. Outro elemento é a constante mudança: toda a realidade leva em si o movimento e, assim, a natureza se torna algo inacabado, em constante transformação. Por fim, o último elemento é a lei fundamental da dialética, na qual todos os objetos carregam em si tanto sua afirmação quanto sua negação. “a contradição é inerente a todas as coisas, sejam materiais ou espirituais, e isso é que faz a transformação ocorrer” (CARDOSO, 2016).

Assim, na Teoria do Enunciado Concreto, elaborada a partir dos escritos do círculo de Bakhtin, os enunciados são descritos em termos dessa concepção dialética, tidos como unidades da comunicação discursiva. Denominamos de Teoria do Enunciado Concreto “a proposição de Bakhtin sobre a natureza dos Enunciados e dos Gêneros do Discurso” (LIMA et al., 2019, p. 264). A partir da investigação sobre a natureza do ato e, com isso, do enunciado, podemos compreender a ação humana como uma totalidade da experiência viva, uma dialética entre a subjetividade da vida e a objetividade da cultura. Com isso, na seção seguinte é discutida a concepção de ato em Bakhtin, visando indicar essa totalidade de vida. Após, são apresentados

o enunciado concreto e os gêneros do discurso, para, por fim, expor a proposta analítica de Lima et al. (2019), que parte da filosofia bakhtiniana para a análise dos enunciados, e explicar a trajetória analítica do presente trabalho.

## 2.2 O ato e a totalidade da vida

Como afirmamos na seção anterior, Lima et al. (2019) descrevem na obra *Para uma filosofia do ato responsável* (2010) os esforços de Bakhtin em reintegrar o mundo objetivo da cultura ao mundo subjetivo das experiências do ser, reatando os polos ontológicos da objetividade/subjetividade que Kant separou. Holquist (2002) comenta sobre o interesse de Bakhtin na escola neokantiana de Marburgo e sua obsessão por Kant. Em especial, destaca que a obra de Bakhtin (2010) é uma tentativa de *destranscendentalizar* Kant e poder pensar além de sua formulação do imperativo ético. Para Kant, a ética pode ser fundada no princípio de que todos os indivíduos morais devem emitir julgamentos como se suas consequências se aplicassem para quaisquer outros sujeitos, e não para casos particulares nos quais estão envolvidos seus interesses pessoais (HOLQUIST, 2002). Kant diferencia o dever por dever do dever por inclinação: só é ético o dever por dever; quando agimos com a finalidade de obtermos um benefício, ou um retorno, estamos agindo por inclinação, ficando distantes do agir ético. Para diferenciarmos o agir ético do agir por inclinação, é necessário analisar a intencionalidade daquele que age; o ato ético é só aquele que é bom em si mesmo, no dever por dever, e não aquele que busca um retorno.

Kant, ao distinguir os conhecimentos puros dos conhecimentos empíricos, assume a existência de juízos universais puros, que não são derivados da experiência, e possuem validade *a priori*. Dessa forma, temos uma realidade teórica de juízos universais que independem da experiência empírica, em que o sentido e a validade desses juízos são dados pela sua posição em relação à realidade teórica, pela sua universalidade. Assim, temos um mundo de juízos independentes do mundo da experiência empírica, onde os conhecimentos empíricos distinguem-se dos conhecimentos puros. Houlquist (2002) afirma que, para Bakhtin, a ética de Kant deixa algo importante de fora: ela ganha autoridade na medida em que acentua a distância entre o específico e o geral. Para o autor (HOLQUIST, 2002, p. 10, grifo do autor), o que Bakhtin pretende é: “[...] entender como a diferença constantemente estimulante entre o que é *agora* e o que é *agora-depois* pode ser transposta na relação que forjo entre eles em toda a singularidade do meu lugar único na existência”. Com isso, Bakhtin busca integrar o mundo da

cultura com o mundo da vida em um momento único e singular da minha existência, o ato, isto é, o encontro do geral e objetivo com o particular e subjetivo<sup>2</sup>.

Para compreendermos essa reintegração feita por Bakhtin, começamos por compreender sua concepção de ato/ação<sup>3</sup> e ato responsável, isto é, os elementos que compõem o ato responsável em sua totalidade e suas inter-relações. Assim, o entendimento do mundo da cultura e do mundo da vida é fundamental para essa constituição da ação responsável. O mundo da cultura, para Bakhtin, é o mundo da consciência teórica, o mundo independente da nossa experiência singular no qual temos as unidades teóricas formadas pela ação humana no passar dos anos. No entanto, essa independência do mundo da cultura em relação à experiência viva não significa impenetrabilidade. O mundo da cultura é estruturado a partir da historicidade das experiências vividas que se apresenta como uma unidade da consciência teórica para o sujeito no evento/ato. Porém, essa unidade da consciência teórica nunca dá a validade ou o sentido de um juízo, pois isso é feito pela resposta do sujeito no momento em que age, a partir do mundo da vida. O mundo da vida, então, é o mundo onde temos nossa existência real, estruturada a partir de padrões do mundo da cultura que devem ser respondidos por nós em cada ato. Vida e cultura são mutuamente estruturadas a partir da ação humana que, por um lado, permite à cultura entrar na vida e, por outro, à vida entrar na cultura.

Essa concepção de ato/ação estende-se desde a ação humana real no mundo até os pensamentos individuais de sujeito. Podemos, então, pensar no ato como uma unidade básica da ação humana. O ato responsável é assim chamado porque deve responder às responsabilidades moral e especial, referentes ao mundo da vida e ao mundo da cultura. A responsabilidade do ato só se dá na medida em que, nele, respondemos a subjetividade do mundo da vida, da situação no momento/ato, e, ao mesmo tempo, a objetividade do mundo da cultura, das unidades teóricas. Somente a partir dessa concepção de ato responsável em sua totalidade é possível superar a separação e impenetrabilidade entre o mundo da vida e da cultura, segundo Bakhtin (2010, p. 44):

---

<sup>2</sup> A menção aos trabalhos de Kant tem o objetivo de mostrar a origem intelectual do problema abordado por Bakhtin, e não o de tratar especificamente da ética kantiana.

<sup>3</sup> Na tradução brasileira temos uma adaptação da expressão “ato” para “ação” a partir de uma tradução não literal da obra, buscando conservar o sentido atribuído por Bakhtin aos conceitos.

O ato deve encontrar um único plano unitário para refletir-se em ambas as direções, no seu sentido e em seu existir; deve encontrar a unidade de uma responsabilidade bidirecional, seja em relação ao seu conteúdo (responsabilidade especial), seja em relação ao seu existir (responsabilidade moral), de modo que a responsabilidade especial deve ser um momento incorporado de uma única e unitária responsabilidade moral. Somente assim se pode superar a pernicioso separação e a mútua impenetrabilidade entre cultura e vida.

Podemos compreender o ato como algo que olha para duas direções opostas ao mesmo tempo, para a experiência real da historicidade do ser e para a objetividade do mundo da cultura, alheia e independente dessa experiência real do ser. Bakhtin compreende essa natureza do ato como sendo bifronte, tal qual o deus romano Jano. Assim, o ato, ou ação, responsável consiste de um evento único e singular na vida do ser, algo que não pode ser repetido ou experienciado da mesma forma por outro ser, e que leva em si a resposta da volição individual do sujeito ao mundo da cultura. Ainda, cada ato é carregado da historicidade desse sujeito, das respostas já formadas ao mundo da cultura, sendo cada ato uma resposta a atos passados. “eu ajo com toda a minha vida, e cada ato singular e cada experiência que vivo são um momento do meu viver-agir” (BAKHTIN, 2010, p. 44). O ato se torna real apenas a partir de sua totalidade, de sua natureza bifronte, isto é, por um lado, olha para o mundo da cultura e, por outro, para o da vida; é com o ato que a cultura e a vida se interpenetram. Por isso, o ato é um encontro entre a experiência singular do ser e uma unidade do mundo da cultura em um evento único.

Como resultado, dois mundos se confrontam, dois mundos absolutamente incomunicáveis e mutuamente impenetráveis: o mundo da cultura e o mundo da vida (este é o único mundo em que cada um de nós cria, conhece, contempla vive e morre) - o mundo no qual se objetiva o ato da atividade de cada um e o mundo em que tal ato realmente, irrepetivelmente, ocorre, tem lugar (BAKHTIN, 2010, p. 43).

No mundo da cultura temos diferentes unidades teóricas dotadas de conteúdo-sentido às quais nossa ação responsável pode responder. Nesse sentido, podemos compreender a percepção estética, o pensamento teórico discursivo e a representação histórica como elementos que estabelecem uma separação de princípio entre “conteúdo-sentido de um determinado ato-atividade e a realidade histórica de seu existir, sua vivência realmente irrepetível” (BAKHTIN, 2010, p. 42). A estética configura imagens objetivas, retiradas de seu conteúdo e do devir efetivo e singular, e, por isso, não é capaz de apreender a unicidade do evento singular. Se desconsiderarmos o papel da volição individual do sujeito na resposta ao mundo da cultura, o ato perde seu sentido na singularidade da vida, seu vir a ser, tomando um sentido único para a cognição dado por uma unidade teórica. Assim, somos levados a compreender a estética como participante do evento apenas como momento da consciência viva e vivente do contemplador.

O mundo da cultura, do conteúdo-sentido, se abstraído do ato, nos leva a compreender o pensamento como juízo de validade universal, referindo-se sempre a sua posição dentro do domínio de uma unidade teórica. A validade teórica objetiva de um juízo do mundo da cultura não é afetada pelo dever das responsabilidades, entretanto, seu sentido é dado somente na resposta a esse juízo. “o dever pode fundar a presença real de um dado juízo em minha consciência em dadas circunstâncias, isto é, a concretude histórica de um fato individual, mas não a veracidade teórica em si do juízo” (BAKHTIN, 2010, p. 45). O juízo tem sua validade referente à unidade teórica que compõe, mas o sentido desse juízo na ação responsável só é dado a partir da resposta da individualidade do eu a ele. Assim, o ato como juízo não independe de justificação teórica, mas deve responder a ela, não tendo seu sentido dado unilateralmente por essa unidade teórica. O mundo teórico é autônomo, abstrato e alheio à historicidade viva e singular, por isso se mantém fechado em suas próprias fronteiras. Nessa perspectiva, o dever funda o juízo da unidade teórica na consciência, mas seu existir real e seu sentido só se dão na resposta do sujeito a tal unidade teórica no existir-evento do ato. O dever das responsabilidades, para Bakhtin, é o que assegura o ato como responsável, pois é com ele que somos levados a responder para a cultura e a vida em uma unidade singular que leva em si essa oposição. Desse modo, a distinção entre criação cultural e vida se torna o cerne da ação responsável em Bakhtin, e é a partir dela que podemos compreender a forma dialética na qual o ato unifica esses dois mundos.

O ato responsável, como evento único e singular do sujeito, responde a uma unidade teórica já estabelecida e, com isso, está sujeito às responsabilidades moral e especial. O conteúdo-sentido de uma unidade teórica e a sua real existência na consciência do ser são momentos unitários inseparáveis na atribuição de valor do pensamento como ato, mas esse valor possui pesos diferentes dependendo da relação que impomos a ele. Podemos tomar como exemplo, semelhante ao trazido por Bakhtin (2010), a diferença de peso entre um objeto pensado e um objeto real. Para a experiência singular e irrepitível do ser, aquilo que por ele é experienciado como um objeto real possui muito mais valor que um objeto apenas pensado. Mas, se medimos esse objeto sob pesos teóricos, a partir de uma unidade teórica, é muito difícil que um objeto pensado seja mais leve que um objeto real, mesmo levando em conta o reconhecimento teórico de sua existência empírica (BAKHTIN, 2010).

O dever das responsabilidades (especial e moral) pode fazer um dado juízo presente em minha consciência, entretanto, esse dever em nada afeta a validade teórica do juízo em si e, também, não impõe a validade teórica de um conteúdo-sentido ao ato. Se fosse o caso,

nasceríamos predeterminados por uma unidade teórica de conteúdo-sentido, isto é, se compreendermos o dever como momento formal do juízo, não há sentido em existir uma ruptura entre vida e criação cultural, entre ato como a subjetividade de um momento singular único do ser e o conteúdo-sentido do juízo como sendo parte de uma unidade teórica objetiva. Para Bakhtin, isso implicaria na existência de um contexto “único de cognição e vida, de cultura e vida, o que, naturalmente, não é o caso” (2010, p. 46). Assim, para o autor, afirmar um juízo como verdadeiro é relacioná-lo com uma unidade teórica, com a historicidade de discursos já enunciados dentro dela, sendo tal unidade, de modo algum, “a unidade histórica singular de minha vida”. A unidade de minha vida é a que responde a essa unidade teórica e, com isso, imprime o sentido que se quer atribuir a tal juízo. O dever em relação às responsabilidades se revela no momento do ato e impõe ao sujeito a necessidade de se responder ao mundo da cultura a partir de sua historicidade. Com isso, não há sentido em falar em um dever puramente teórico; o dever é inerente ao ato e, com isso, às responsabilidades. Não há sentido em atribuir o dever do ato como exclusivo do conteúdo teórico, a responsabilidade especial do ato. O dever, segundo o autor,

[...] se revela apenas na correlação da verdade (válida em si mesma) com a ação cognitiva real de cada um de nós, e tal momento de correlação é historicamente um momento único, é sempre um ato individual, que não afeta em nada a validade teórica objetiva do juízo - é um ato que é avaliável e imputável no contexto único da vida real única de um sujeito (BAKHTIN, 2010, p. 46).

Isto é, a veracidade, enquanto relação de um juízo com uma unidade teórica, implica em um movimento de reconhecimento da verdade pelo ato de resposta do sujeito. O sujeito deve responder para a relação feita entre o juízo firmado verídico e a historicidade da unidade teórica à qual ele é comparado. Assim, Bakhtin (2010, p. 46) segue: “Para o dever não é suficiente apenas a veracidade, <é necessário> o ato de resposta do sujeito, que provém do seu interior, a ação de reconhecimento da veracidade do dever, e também esta ação não penetra, de modo algum, na composição teórica e no significado do juízo”. O dever não é dedutível de nenhuma proposição teórica, e nenhuma delas pode levar em si o dever, pois não possui conteúdo teórico definido e específico. O dever é de origem do agir-ato, onde tudo é ato do sujeito, até mesmo pensamentos e sentimentos. Logo, ele pode ser compreendido como uma manifestação, ou atitude, da consciência. Nesse sentido, para Bakhtin (2010, p. 47):

Não existe um dever estético, científico e, ao lado deles, um dever ético: há apenas o que é estética, teórica e socialmente válido e ao qual se pode agregar um dever a respeito do qual todas estas validades são de caráter técnico, instrumentais. Tais posições adquirem sua validade no interior de uma unidade estética, científica, sociológica; enquanto adquirem o dever na unidade de minha vida singular e responsável.

O sujeito é quem deve saber “em que consiste e quando deve cumprir seu dever moral ou, mais precisamente, o dever (porque não existe um dever especificamente moral)” (BAKHTIN, 2010, p. 48). A partir dessa perspectiva, o sujeito que age responsável é aquele que tem a autonomia necessária para compreender em que consiste o papel moral e quando ele deve cumpri-lo, que tem o dever no agir responsável referente às suas responsabilidades.

Assim, não se pode considerar o mundo da consciência teórica como o único, pois, se assim fosse

nós nos retiráramos da vida ,concebida como devir-ato responsável, arriscado, aberto, para um existir teórico indiferente, por princípio concluso e completo (não no sentido de que é concluído e determinado apenas no processo cognitivo, mas como um existir já determinado justamente enquanto dado) (BAKHTIN, 2010, p. 52).

Não é possível viver no mundo teórico porque ele não leva em conta a minha existência singular; ele existe independentemente da unidade de minha vida. O mundo teórico não pode impor critérios para o meu ato responsável pelo fato de que nele o eu não vive. É somente nessa resposta exigida pelas responsabilidades que o ato responsável como juízo adquire seu sentido e sua validade.

Bakhtin leva dois mundos ao confronto, o da cultura e o da vida, onde tal expressão, “confronto”, não deve ser entendida como um embate do qual um dos dois sai vitorioso. O confronto a que nos referimos é, de certa forma, uma dialética dos dois mundos incumbidos em uma unidade singular indissociável: o ato responsável. Assim, em cada ato responsável, respondemos ao mundo da cultura, de diferentes unidades de conteúdo-sentido, em um evento único e singular da nossa experiência viva. O ato é a realização de uma decisão, uma conclusão, onde tudo entra como elemento de sua motivação responsável; “o ato constitui o desabrochar da mera possibilidade na singularidade da escolha uma vez por todas” (BAKHTIN, 2010, p. 81). Nesse desabrochar da mera possibilidade temos a totalidade da vida expressa com o ato, onde a historicidade do sujeito responde a um juízo já estabelecido do mundo teórico.

A validade de um juízo do mundo da consciência teórica não depende do evento vivido; o que depende dele é a existência desse juízo em dada consciência. Para Bakhtin (2010, p. 55):

A validade extratemporal de todo o mundo teórico da verdade, por sua vez, entra por completo na historicidade real do existir-evento. Evidentemente, não entra aí temporalmente ou espacialmente (todos estes são momentos abstratos), mas como momento que enriquece o existir-evento. Somente aquilo que da cognição pertence a categorias científico-abstratas é, por princípio, teoricamente alheio ao sentido conhecido abstratamente. O ato real de cognição - não do interior de seu produto teórico-abstrato (isto é, desde o interior de um juízo universalmente válido) mas como ato responsável - incorpora cada significado extratemporal no existir-evento singular. Todavia, a contraposição habitual entre a verdade eterna e a nossa temporalidade imperfeita possui um sentido não teórico; tal asserção inclui em si certo sabor axiológico e assume um caráter emotivo-volitivo: eis aqui a verdade eterna (e isso é bom), e eis aqui a nossa imperfeita vida temporal, transitória, efêmera (e isso é mau).

O mundo teórico não tem sua validade dependente da nossa temporalidade, mas essa validade adentra o existir-evento de forma a enriquecê-lo. O ato de cognição como ato responsável incorpora os significados extratemporais em seu existir-evento singular, entretanto, na relação entre a verdade extratemporal e nosso existir temporal, essa incorporação toma um caráter emotivo-volitivo. Para todo ato efetivo é momento imprescindível o recebimento de uma entonação emotiva-afetiva. “Tudo que é efetivamente experimentado o é como alguma coisa que concerne simultaneamente ao dado e ao por-fazer-se, recebe uma entonação, possui um tom emotivo-volitivo, entra em relação afetiva comigo na unidade do evento que nos abarca” (BAKHTIN, 2010, p. 86). Em todo ato expresso é imprescindível a atribuição de uma entonação que revela o sentido atribuído ao objeto a que se refere, a relação do sujeito com ele.

Com isso, o ato é composto por um aspecto de conteúdo-sentido, a partir da resposta à unidade teórica, e por um aspecto emotivo-volitivo, a entonação que caracteriza o elemento afetivo-emotivo do sujeito no evento. Por isso, quando expresso, o ato responsável exige a plenitude da palavra dita,

isto é, tanto o seu aspecto de conteúdo-sentido (a palavra conceito), quanto o emotivo-volitivo (a entonação da palavra), na sua unidade. E em todos esses momentos a palavra plena e única pode ser responsabilmente significativa: pode ser a verdade (*pravda*), e não somente qualquer coisa de subjetivo e fortuito (BAKHTIN, 2010, p. 84, grifo do autor).

Para Bakhtin, a filosofia primeira, que busca se aproximar do existir-evento (mundo no qual o ato toma consciência de si mesmo e se realiza de maneira responsável), não pode estabelecer leis universais sobre esse mundo. Ela só pode, no entanto, ser uma descrição fenomenológica, “uma fenomenologia de tal mundo do ato” (BAKHTIN, 2010, p. 83). Assim, no ato, um objeto nunca é dado pelo mundo da consciência teórica, mesmo que imaginado. Isto é, ele sempre vem acompanhado de uma ação, de algo a ser feito, de uma resposta a ser dada a ele.



Um objeto existe por si só apenas enquanto objeto do mundo da cultura. No momento em que se torna presente no meu ato responsável, esse objeto assume uma dimensão dinâmica na minha experiência viva; enquanto experiencio esse objeto, ele adquire um caráter de vir-a-ser, de algo a se realizar, tendo sua existência real dependendo da relação com o sujeito. Esse objeto dado no mundo da cultura e esse vir-a-ser que ele assume no evento são momentos inseparáveis do ato. Da mesma forma podemos compreender a palavra plena de Bakhtin: ela não expressa diretamente um significado dado de um objeto em relação ao mundo da cultura, mas a minha relação com esse significado, minha ação, aquilo que vem a ser. Com isso, a palavra adquire o tom emotivo; a partir da entonação, mais do que o objeto dado, ela expressa a minha relação com ele, como uma atitude avaliativa de tal ato, do que é desejável e indesejável dele. A partir disso, “[...] movimenta-o [o objeto] em direção do que ainda está por ser determinado nele, torna-se momento de um evento vivo” (BAKHTIN, 2010, p. 86). Desse modo, o ato adquire seu tom emotivo-volitivo, que não é específico da pronúncia da palavra, estando presente no próprio ato pensado. A função do objeto no evento, o seu valor real, é, então, a entonação dada à relação do sujeito com ele.

O ato responsável é inseparável em seu existir-evento, isto é, os elementos que constituem o ato não podem ser abstraídos individualmente desse momento que o torna real. O valor do ato só pode ser compreendido se analisado a partir de sua totalidade, das inter-relações entre os elementos constituintes do ato expressas na singularidade do evento. Similarmente, podemos compreender a palavra plena que expressa o ato apenas a partir de sua totalidade e dessas inter-relações entre seus elementos. Dessa forma, podemos analisar a palavra dita plena se levarmos em consideração a totalidade dos elementos que a constitui. Com isso, temos base para compreender a teoria comunicativa em Bakhtin a partir da aproximação entre o enunciado e a ação responsável. Junto da noção de unidade dialética, temos um enunciado como o menor elemento da ação discursiva humana, o menor elemento de comunicação expresso como ato comunicativo. Diante disso, “A língua passa a integrar a vida através de enunciados concretos (que a realizam); é igualmente através de enunciados concretos que a vida entra na língua” (BAKHTIN, 2016, p. 16-17). Na seção que segue, serão apresentados e discutidos, de forma mais específica, os elementos que constituem um enunciado e, na próxima, uma proposta para sua análise.

### 2.3 Enunciado concreto e gênero do discurso

Um enunciado é um ato comunicativo de natureza dialética em que temos, de um lado, o discurso único e singular de cada ser, que jamais pode ser repetido ou experienciado da mesma forma por outro ser, e, de outro, uma produção que não é feita de maneira completamente livre pelo sujeito, pois, quando se encontra em um campo de ação específico, o discurso responde a um determinado gênero já estabelecido. “Evidentemente, cada enunciado particular é individual, mas cada campo de utilização da língua elabora seus *tipos relativamente estáveis* de enunciados, os quais denominamos de *gêneros do discurso*” (BAKHTIN, 2016, p. 12, grifo do autor). Isto é, um gênero do discurso é um padrão preestabelecido, relativamente estável, para o enunciado quando feito dentro de um campo de ação. É necessário, no entanto, uma ênfase no “relativamente estável”. O gênero do discurso não é um objeto dado pelo mundo da cultura; ele se torna real no existir-evento do ato justamente pela resposta que o sujeito lhe dá, pela sua atitude avaliativa e pela entonação conferida ao enunciado. O gênero não estabelece, univocamente, o sentido e a forma do enunciado; eles são estabelecidos a partir da resposta do sujeito.

Assim, devemos compreender os elementos constitutivos do enunciado como sendo indissociáveis, e essa completude do ato “reflete não somente a volição do eu, mas a relação do eu com o mundo; ele está duplamente direcionado, voltando-se para a vida e para a cultura, para o sujeito e para a sociedade” (LIMA et al., 2019, p. 265). Cada enunciado é um ato comunicativo que expressa nossa resposta ao mundo da cultura. Com isso, podemos observar a relação entre o ato responsável e o enunciado, em que o dever das responsabilidades leva à necessidade da palavra plena, e, assim, a resposta do ser ao mundo dotada de uma entonação afetiva. O enunciado, então, se dá na singularidade do evento-ato onde temos a fusão dos aspectos individuais do ser e as condições presentes no campo de ação onde ele ocorre.

[...] todo ato discursivo, enunciado, é único e singular, porque é um evento do Ser, mas é sempre social, visto que é construído em um gênero do discurso. Ele possui elementos que expressam a liberdade do autor e elementos que refletem a condição do campo de comunicação em que é produzido (LIMA et al., 2019, p. 266).

De forma geral, o enunciado é concebido como uma unidade dialética, constituindo o menor elemento da comunicação, sendo sua natureza a do eu e de sua relação com o mundo. Com isso, o gênero do discurso se torna uma espécie de referencial para a formação do enunciado por ser um padrão geral já estabelecido para o discurso em determinado campo a

partir de enunciados anteriores. Entretanto, há uma diferença na apropriação desses discursos na formação de novos enunciados. Bakhtin subdivide os gêneros do discurso em primários (simples) e secundários (complexos). Os gêneros primários são desenvolvidos nas condições da comunicação discursiva imediata, levando em si elementos mais próximos da realidade vivida. Já os gêneros secundários, elaborados em um contexto cultural mais complexo e robusto (como em obras literárias, pesquisas científicas, meios sociopolíticos), incorporam e ressignificam elementos dos gêneros primários e, com isso, “perdem o vínculo imediato com a realidade concreta e os enunciados reais alheios” (BAKHTIN, 2016, p. 15). Um gênero complexo incorpora os elementos da atividade cotidiana e os distancia da realidade vivida, como um drama, ou um romance, que incorpora elementos de comunicação cotidiana na construção de um enunciado complexo que se constitui distante da realidade cotidiana.

A concepção de comunicação é estruturada a partir da ideia de que o enunciado é sempre endereçado a alguém, direcionado pelo sujeito que enuncia, e, por isso, está submetido a fatores sociais do campo em que é formado. A formação de um enunciado se dá visando uma determinada resposta ou reação do contexto onde ocorre. Assim, para compreendermos o enunciado precisamos compreender a quem ele se direciona e qual é a reação esperada no campo.

Quando o locutor produz seu enunciado, ele o faz sempre de forma intencional; o enunciado não é um produto aleatório, mas uma ação, um ato, fruto da vontade. O locutor, portanto, estrutura seu enunciado almejando produzir uma resposta específica no seu interlocutor concreto – isso é o que Voloshinov (1981) chamou de orientação social do enunciado (LIMA et al., 2019, p. 266).

Todo enunciado tem uma orientação social, ou seja, é orientado pelo gênero do discurso do campo de ação em que é elaborado. Se o gênero do discurso de determinado campo é predeterminado pelos discursos já enunciados dentro desse campo, então todo enunciado é orientado por, e com isso faz referência a, um discurso já enunciado. O discurso mostra, assim, sua historicidade. Ele é direcionado pelo curso histórico de suas atribuições e construções, tendo seu sentido atribuído pela individualidade do sujeito em um ato único e singular. Logo, podemos entendê-lo como um elo na cadeia da comunicação verbal (LIMA et al., 2019), sendo essa uma relação entre a formação dos enunciados e os enunciados anteriores.

Um enunciado engloba a vida e a cultura, dois mundos complexos e amplos, em um único e singular evento. Os limites do enunciado nesse evento-ato são impostos por Bakhtin a partir de dois critérios de delimitação: a alternância de sujeitos e a conclusibilidade. A alternância de sujeitos estabelece que o enunciado “começa quando um locutor fala e termina

quando ele acaba de falar, dando início a uma resposta” (LIMA et al., 2019, p. 267). A conclusibilidade, por sua vez, estabelece a possibilidade de resposta, sendo identificada a partir de três formas: a exauribilidade semântico-objetiva, o projeto de fala do locutor e o estilo de acabamento específico de cada gênero.

Como discutimos anteriormente, é na resposta da subjetividade do eu a uma unidade objetiva do mundo da cultura que temos a atribuição de sentido ao ato. Similarmente, para o enunciado, a exauribilidade semântico-objetiva representa o sentido que pode ser dado pelo locutor ao objeto do qual ele fala, entretanto, “essa finalização nunca é peremptória, mas contingente ao contexto de fala” (LIMA et al., 2019, p. 267). Junto disso temos o projeto de fala do locutor, sua vontade de produzir sentido que acaba por fornecer uma estruturação prévia ao enunciado, o que nos indica a intenção do locutor ao falar. Por fim, os gêneros do discurso possuem suas próprias formas de acabamento, o elemento que nos indica sua finalização, e esses elementos podem ser estruturais (referentes à ordem, ou estrutura geral, a qual o enunciado segue), fraseológicos, sintáticos e de entonação. A partir dessas características, podemos delimitar a unidade do enunciado e realizar uma primeira análise de alguns de seus aspectos.

Ainda, Bakhtin destaca três características a se identificar em um enunciado: tema, estilo e estrutura composicional. Um enunciado sempre se forma em meio a uma temática, cuja amplitude tem seus limites relativamente determinados pelo gênero do discurso no qual esse enunciado se dá. Ao elaborarmos um enunciado no gênero científico médico, podemos falar a respeito de uma série de temas relacionados à saúde, mas não faz sentido falarmos sobre publicidade ou astrofísica. Ainda, esse enunciado está sujeito a um estilo específico, precisa fazer referência a estudos anteriores, seguir uma metodologia, apresentar evidências e argumentar sobre elas. Por fim, o enunciado exige uma estrutura composicional, a estruturação na construção do enunciado; no caso do gênero científico médico, essa estrutura segue a dos artigos científicos em geral. (i.e., possui um título, resumo, referencial teórico, metodologia, conclusões e referências). A partir dessas três características, junto dos critérios de delimitação, um enunciado formado dentro de um determinado gênero do discurso pode ser compreendido.

Entretanto, dentre os diferentes gêneros do discurso temos distintos graus de reflexo da individualidade do locutor, de sua relação com o mundo objetivo. Em gêneros literários (drama, comédia, romance, ficção) temos um reflexo maior da individualidade do locutor, devido ao fato de que seu estilo, tema e estrutura composicional permitem uma maior flexibilidade e apropriação direta dos gêneros simples na construção do enunciado. Contudo, em um gênero

como o científico, ou o de documentos oficiais, estilo, tema e composição não permitem um reflexo tão direto da individualidade do locutor. Todavia, mesmo com essa variação no grau de individualidade do sujeito expresso no discurso, a individualidade é sempre um momento indissociável do enunciado. Nos exemplos citados de gêneros com menor reflexo da individualidade, por mais sutis que sejam esses reflexos, eles sempre estão presentes. Nenhum enunciado, por mais formal e pragmático que seja, suprime por completo a volição individual do locutor, muito menos sua atitude avaliativa frente ao objeto.

Em especial, podemos notar que o gênero do discurso é algo que vem com certa objetividade do mundo da cultura que se torna real no evento-ato ao ser respondido pelo sujeito, mantendo-se relativamente estável a partir de um dado padrão (formado a partir de enunciados anteriores e representado pelas três características mencionadas). Na resposta a isso temos a atribuição de um tom emotivo-afetivo ao enunciado, que expressa nossa atitude avaliativa frente a esse objeto e, com isso, nossa relação com ele. A partir do gênero do discurso, da nossa relação com ele e com o objeto ao qual estamos nos direcionando, temos possíveis respostas esperadas ao que está para ser falado, que levamos em consideração na formação do enunciado<sup>4</sup>. Ao anunciarmos, expressamos um projeto de fala elaborado a partir da nossa relação com o gênero do discurso e o mundo da cultura, empregando-lhe sentido e visando uma certa resposta no interlocutor.

Em um enunciado oral, a expressão da individualidade do locutor se dá, em partes, pela entonação empregada. No entanto, em enunciados escritos, acabamos por reproduzir mentalmente o tom atribuído a ele. “Assim, uma mesma oração-enunciado pode ser proferida com tom sério ou com tom de ironia. A oração é a mesma nos dois casos, mas quando ela se torna um enunciado concreto, o tom utilizado modifica totalmente o seu papel na cadeia de comunicação verbal” (LIMA et al., 2019, p. 267). Com isso, podemos observar a diferença entre enunciados e orações. Orações são dotadas de significado por si só, isto é, o contexto no qual elas estão inseridas não influencia seu significado; ele é intrínseco à palavra. Enunciados, por sua vez, possuem também uma entonação expressiva que lhes atribui significado. Assim, quando enunciamos uma palavra em nosso discurso, a carregamos com um tom emotivo-volitivo que é característico do sujeito, entretanto, também carregamos a tonalidade original das palavras empregadas.

Além do significado dado pela etimologia das palavras empregadas, temos o significado histórico e socialmente atribuído a elas, junto do sentido que desejamos empregar. Uma mesma

---

<sup>4</sup> Como já mencionamos, todo enunciado é formado visando uma determinada resposta.

palavra tem diferentes possíveis significados no momento em que a tornamos real, em que o sentido último dado é aquele expresso pela entonação e composição atribuída. Com isso, dizemos que o entendimento do enunciado depende das condições que o cercam, ou, “O entendimento do enunciado depende de sua parte extraverbal” (LIMA et al., 2019, p. 268). Essa dimensão extraverbal é composta de três elementos, que, segundo os autores, são: espaço-tempo, objeto de que se fala e posição dos interlocutores sobre o assunto. Só compreenderemos o significado de um enunciado se compreendermos o objeto do qual o locutor fala, o local e momento em que ele fala e para quem ele fala.

Essa noção de espaço-tempo como as coordenadas nas quais o evento-ato ocorre é, segundo Lima et al. (2019), diretamente influenciada pela Teoria da Relatividade de Einstein. Bakhtin nomeia essa noção de cronotopo. Segundo Holquist (2002, p. 150), “Cronotopo, como situação, sempre combina fatores espaciais e temporais com uma resolução de sua significância sendo julgada a partir de um ponto de vista particular”. Isto é, o cronotopo descreve a posição especial e o momento temporal em que um ato ocorre, o estado do objeto do qual se fala no lugar onde se fala. Um enunciado elaborado a partir da análise de outro enunciado também está situado em uma dimensão espaço-temporal que fornece os elementos extraverbais mencionados.

Dessa forma, a análise de um enunciado leva em consideração os aspectos ligados ao gênero do discurso, aos objetos do mundo da cultura e às respostas a eles, o sentido que se deseja dar ao enunciado, as respostas que se espera obter, a avaliação feita ao objeto de que se fala, etc. Para que possamos analisar um enunciado sem ir contra sua totalidade, precisamos analisar os elementos que o constituem e expressá-los em termos de um novo enunciado. A análise de um enunciado só pode ser feita real tal qual um enunciado, isto é, a partir de sua totalidade. Além disso, esse novo enunciado não é carregado apenas de uma compreensão de outro enunciado, mas, sim, da nossa compreensão de outro enunciado, pois, independentemente de qualquer coisa, ela também é um enunciado. Por isso não podemos fragmentar e abstrair elementos de uma análise de um enunciado, pois ela só existe em sua totalidade.

#### **2.4 A proposta analítica para o enunciado concreto**

Como já mencionamos, a teoria do enunciado concreto é a proposição de Bakhtin a respeito da natureza dos enunciados (LIMA et al., 2019). Assim, qualquer proposta para sua análise deve englobar os elementos constituintes dessa natureza, visando formar um novo

enunciado. Lima et al. (2019, p. 271) apresentam uma trajetória analítica para interpretar enunciados a partir da Teoria do Enunciado Concreto e da interpretação metalinguística: “o que propomos é apenas uma sugestão de sistematização dos conceitos apresentados na Teoria do Enunciado Concreto”. Como ressaltam os autores, esse processo não pode ser reduzido a uma sequência de passos; ele é uma forma de se interpretar e compreender um enunciado a partir de sua própria natureza. Além disso, considerando o que já argumentamos anteriormente, uma análise de tal forma leva em si as características individuais de quem a realiza. Sendo assim, dois indivíduos que realizam a mesma análise do mesmo objeto chegarão a resultados distintos, pois a análise só pode existir por completo a partir dessa expressão individual de quem analisa.

Uma vez que o conceito de “excedente de visão” motiva o distanciamento do pesquisador em relação ao objeto estudado, deve-se notar que a Teoria do Enunciado Concreto pode trazer elementos de outras teorias no processo de interpretação. Ao olhar para um texto didático, podemos explicitar suas relações dialógicas com diferentes visões epistemológicas, identificando seu posicionamento sobre a natureza da ciência, ou trazer visões sobre a prática docente, ou sobre concepções didáticas (LIMA et al., 2019, p. 271).

A análise a partir do enunciado concreto nos permite discorrer a respeito da relação entre o que está sendo analisado e outras teorias, tornando possível a compreensão das filiações teóricas de um enunciado. Dessa forma, segundo a descrição de Lima et al. (2019), a trajetória passa pelos seguintes momentos: 1) identificar o enunciado e o contexto imediato; 2) identificar o gênero do discurso; 3) analisar o direcionamento e a orientação social do enunciado; 4) analisar a responsividade; 5) analisar o estilo; 6) integrar o resultado em um novo enunciado. A partir desses seis momentos, podemos analisar e compreender um enunciado em sua totalidade e expressá-lo em termos de um novo enunciado.

No primeiro momento é identificado o objeto de análise, o enunciado, a partir dos elementos descritos por Bakhtin como as delimitações de um enunciado: alternância e conclusibilidade. É nesse momento que identificamos o autor, o espaço e tempo no qual ele enuncia e o tema do enunciado. Passando para o segundo momento, temos a identificação do gênero do discurso (romance, drama, científico, didático, diálogo cotidiano, etc.). “Nesse ponto, é importante identificar ou caracterizar as finalidades e condições da atuação humana em que esse gênero é elaborado” (LIMA et al., 2019, p. 271). Isto é, nesse momento fazemos uma descrição do gênero no qual o enunciado é formado, focando nas condições de ação em torno do que ele impõe. No terceiro momento analisamos o direcionamento do enunciado, sua orientação social. Aqui discorreremos a respeito do endereçamento do enunciado, a quem ele se

dirige, para qual público se destina. Lima et al. (2019) ainda pontuam que o endereçamento de um enunciado não é sempre explícito, como em um diálogo cotidiano. Em um livro didático, por exemplo, não observamos diretamente seu endereçamento, mas sabemos que ele é destinado para um público em um ambiente de formação cujo nível de escolarização é explicitado no próprio direcionamento do material (um livro didático de ensino superior é sempre destinado a alunos do ensino superior).

No quarto momento temos a análise da responsividade, dos enunciados passados aos quais o enunciado analisado responde. Essa é a etapa mais rica e ampla do processo de análise, pois é quando se pode “confrontar um mesmo texto com uma infinidade de enunciados, construindo e explicitando novos sentidos” (LIMA et al., 2019, p. 272). Esse é o momento em que podemos identificar as filiações teóricas do enunciado em questão, relacionando-o aos enunciados com os quais ele dialoga. Entretanto, como ressaltam os autores, as respostas obtidas nessa etapa dependem do excedente de visão de quem interpreta, ou seja, do conhecimento do interpretador a respeito dos elementos do mundo da cultura que podem ser relacionados com tal enunciado. Em um enunciado do próprio Bakhtin, por exemplo, podemos analisar a responsividade em relação aos enunciados anteriores de Marx e, também, problematizá-lo frente a outros enunciados formulados posteriormente.

No quinto momento temos a análise do estilo e da estrutura composicional do enunciado a partir de elementos lexicais, fraseológicos e sintáticos. Aqui podemos ter a expressão, em maior ou menor grau, do projeto de fala do locutor devido a suas escolhas dentro dos diferentes recursos da língua. Lima et al. (2019) nos trazem o exemplo dado por Bakhtin nas diferentes formas de se transmitir uma informação: podemos dizer “eu quebrei o vaso” tanto quanto “o vaso foi quebrado por mim”. Na primeira temos o foco no sujeito que quebrou o vaso, na segunda o foco está no vaso que foi quebrado pelo sujeito. Ainda, nessa etapa é possível fazer a conexão entre o discurso e a natureza, pois se pode identificar a forma como os recursos linguísticos são utilizados para “efetuar ou materializar as investigações científicas” (LIMA et al., 2019, p. 271). Por fim, no último momento temos a reconciliação de todos os elementos da análise na formação de um novo enunciado, que expressa o excedente de visão do sujeito que analisa. Dessa forma, a análise de um enunciado pode ser feita respeitando sua natureza indissociável, devendo seu resultado final ser um novo enunciado que expressa a resposta do sujeito investigador ao enunciado analisado.

A partir disso, a trajetória analítica que é percorrida nos capítulos seguintes inicia com uma descrição do contexto extraverbal do enunciado de Bohm. Posteriormente é feita uma



descrição geral do enunciado e, por fim, a análise dos elementos discursivos à luz do quadro teórico bakhtiniano.

A descrição do contexto extraverbal do enunciado é feita no Capítulo 3 em duas perspectivas distintas. Primeiramente, fazemos uma descrição do contexto extraverbal a partir do mundo da cultura, isto é, dos enunciados originais da Teoria Quântica que são respondidos por Bohm em seu enunciado didático. Com isso, é possível visualizar alguns dos elementos da TQ que não são diretamente enunciados por Bohm, mas que permeiam as discussões no campo. Em um segundo momento, fazemos uma descrição do contexto extraverbal do enunciado a partir do mundo da vida, isto é, da reconstrução dos traços biográficos de David Bohm e de suas características enquanto ser, de sua experiência viva. Assim, podemos olhar para o enunciado de Bohm, seu ato comunicativo, a partir das duas dimensões que se entrelaçam em sua constituição, a vida e a cultura.

Ao adentrarmos propriamente na análise do enunciado de Bohm à luz dos conceitos bakhtinianos, começamos por uma descrição geral do livro *Quantum Theory* (1951), destacando a rota seguida. Na sequência, trazemos a relação entre as características do enunciado de Bohm e os conceitos Bakhtinianos já mencionados, representada pelo Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 – Relação entre as características identificadas e os conceitos bakhtinianos

<b>Conceitos bakhtinianos</b>	<b>Características identificadas</b>
Gênero do discurso	Livros didáticos
Estilo	Construção e justificação de conceitos
Estrutura composicional	Alternância entre o concreto e o abstrato
Vozes subjacentes	Interpretação da complementaridade de Bohr
Tema	Fundamentos e limites da Física

Fonte: autor, 2022.

As relações apresentadas são discutidas no quarto capítulo, no qual estabelecemos paralelos entre a abordagem dada por Bohm e as que usualmente encontramos em livros didáticos vinculados ao tema. A partir do exposto nesta seção, seguimos para a descrição do contexto extraverbal e a análise do enunciado didático de Bohm.

### 3 DAVID BOHM E A TEORIA QUÂNTICA

Antes de adentrarmos nos elementos presentes no enunciado didático a ser analisado, é pertinente uma breve reconstrução histórica dos desenvolvimentos da Física do século XX que levaram ao surgimento da Teoria Quântica e que são registrados no livro *Quantum Theory* (BOHM, 1951), além dos aspectos biográficos de David Bohm, que nos proporcionam o entendimento do contexto extraverbal de seu enunciado, a partir da obra de Olival Freire Jr., *David Bohm: a life dedicated to understanding the Quantum World* (2019). Nessa perspectiva, apresentamos na continuidade uma contextualização histórica da Teoria Quântica, com ênfase nos enunciados respondidos por Bohm em sua obra, e, na sequência, a reconstrução dos seus aspectos biográficos.

#### 3.1 A Física do século XX e o surgimento da Teoria Quântica

Freire Jr., Pessoa Jr. e Bromberg (2011, p. 11) definem a TQ desenvolvida no início do século XX como sendo “a mais bem-sucedida teoria física hoje disponível”. O motivo de tamanha confiança na teoria se deve tanto às inúmeras aplicações e tecnologias desenvolvidas a partir dela, como a invenção do transistor e do laser, quanto às diferentes corroborações experimentais que indicam sua pertinência. Contudo, segundo os autores, mesmo com o sucesso científico e tecnológico da TQ, ainda persiste entre os cientistas uma série de incertezas quanto à interpretação dos seus fundamentos. Eles ainda afirmam que essas incertezas “derivam do fato de que ela [a Teoria Quântica] desafia as nossas intuições não só de senso comum mas mesmo aquelas enraizadas no desenvolvimento da Física nos últimos séculos” (2011, p. 11).

Ao analisarmos, sob lentes atuais, o desenvolvimento da ciência no final do século XIX e início do século XX, podemos observar o surgimento de um novo campo. Tal concepção só nos é clara nos dias de hoje ao examinarmos a história e o desenvolvimento do que tratamos como Física Moderna (FM). Esse novo campo, como concebemos na atualidade, inaugura novos paradigmas, consolidando-se sob a forma de duas linhas de pesquisa oriundas do estudo da radiação, de suas origens e interações: a Teoria Quântica<sup>5</sup> e a Teoria da Relatividade.

Como marco inicial dessa nova maneira de se relacionar com o mundo natural, podemos destacar o ano de 1905, com a publicação de cinco artigos pelo cientista alemão Albert Einstein.

---

<sup>5</sup> Neste período inicial podemos encontrar nomenclaturas como “microfísica”, “física atômica”, “teoria dos quantas de ação”, sendo assim, está claro que nos referimos à Física das menores partes da matéria.

Dois desses artigos são considerados fundamentais para a instituição dessas duas linhas de pesquisa que se seguiram. No artigo “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”<sup>6</sup> (EINSTEIN, 1905a), o cientista lança um novo olhar ao conceito de tempo, antes tido como absoluto pelos preceitos da teoria newtoniana, passando a ser visto como relativo ao estado de movimento do observador. O artigo introduz a Teoria da Relatividade, que, posteriormente, foi dividida em Teoria da Relatividade Restrita (TRR) e Teoria da Relatividade Geral (TRG). O segundo artigo de Einstein, considerado um marco teórico para a introdução da Física Moderna, foi “Über einen die Erzeugung und Umwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Standpunkt”<sup>7</sup> (EINSTEIN, 1905b), no qual é analisada a variação de entropia da radiação em uma cavidade oca. Nele, Einstein argumenta em favor de uma quantização da radiação.

O próximo ponto a se destacar na teoria consiste na extensão dessa quantização para a própria estrutura da matéria a partir dos trabalhos de Niels Bohr (1913), o qual propõe um modelo atômico com órbitas quantizadas em níveis de energia para os elétrons, unindo a TQ à Física Atômica. Sommerfeld (1916) estende o modelo de Bohr para uma melhor descrição das linhas espectrais observadas. De Broglie, na década de 1920, propõe uma interpretação dual para a natureza da matéria, elaborando uma relação matemática entre propriedades corpusculares e ondulatórias. Com isso, matéria e radiação passam a ser vistas sob uma perspectiva dual, podendo assumir propriedades ondulatórias e corpusculares. Dando sequência à concepção ondulatória, Schrödinger formula uma equação capaz de fornecer uma função de onda para a descrição do estado de uma partícula, demonstrando resultados condizentes com o modelo de Bohr. A partir da equação de onda de Schrödinger, temos o surgimento da mecânica ondulatória quântica. Ainda, Max Born oferece uma interpretação para a função de onda na qual seu módulo quadrado nos fornece a densidade de probabilidade de uma partícula ser encontrada em determinada região.

No entanto, antes mesmo de Schrödinger formular sua mecânica ondulatória para a Teoria Quântica, Werner Heisenberg desenvolve uma formulação matricial para a descrição do estado de uma partícula, demonstrando ser condizente com os resultados experimentais do modelo de Bohr. Heisenberg também encontra uma imposição fundamental para a Mecânica Quântica, o princípio da incerteza, segundo o qual não é possível obter, simultânea e precisamente, os valores de duas grandezas expressas por dois operadores que não comutam. A principal consequência desse princípio é a interpretação assumida, defendida por Heisenberg,

---

<sup>6</sup> Título em português: “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”.

<sup>7</sup> Título em português: “Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz”.

de uma realidade alternada. Isto é, quando uma das grandezas é conhecida, a outra grandeza deixa de ser real. Assim, a realidade é somente aquilo que está em interação com os aparatos experimentais no momento da medição.

A principal linha interpretativa adotada pela teoria foi elaborada por Niels Bohr a partir de uma perspectiva de totalidade inalisável entre observador e observado, entre a realidade física observada e as condições experimentais envolvidas nessa observação. Assim, as propriedades da matéria, por exemplo sua natureza dual, seriam complementares frente às condições experimentais proporcionadas. Com isso, Bohr busca apresentar uma ligação entre a realidade quântica, microscópica, e a realidade clássica, macroscópica. Bohr apresenta essa concepção complementar a partir da elaboração de seu princípio da complementaridade, e essa ligação entre as realidades clássica e quântica, a partir do princípio da correspondência – segundo o qual as descrições da Mecânica Quântica devem ser feitas em termos da Física Clássica (FC), na qual os fenômenos contínuos da FC são aproximação dos fenômenos discretos da MQ quando se tem um grande número de quantas.

Mesmo a complementaridade de Bohr seguindo como a principal linha interpretativa, a aproximação do autor com pesquisadores como Heisenberg, Pauli, Born e Dirac, posteriormente, resultou no alastramento de uma interpretação mista para a MQ, centrada no grupo de Copenhague. Sobre essa interpretação, que ficou conhecida como “interpretação de Copenhague”, Bohm (1957) afirma que ela se sustenta sob três pilares. O primeiro diz respeito a uma interpretação probabilística da função de onda de Erwin Schrödinger, defendida por Max Born, a qual estipula que um sistema físico é descrito por uma função de probabilidade. O segundo é o princípio da complementaridade, elaborado por Niels Bohr, que descreve a natureza da matéria e da radiação como dual; isto é, os conceitos de onda e partícula não são necessariamente opostos, mas complementares, de modo que um não exclui o outro, mas ambos tampouco se sobrepõem – daí o nome do princípio. Por fim, o terceiro pilar retrata a mecânica matricial, elaborada e reinterpretada por Werner Heisenberg, sustentada pelo princípio da incerteza, também de sua própria autoria, que expressa a impossibilidade de realizar medições precisas e simultâneas de grandezas distintas em um sistema quântico.

Com isso, a MQ é interpretada a partir de uma concepção probabilística não determinista, influenciada pelas concepções empírico-lógicas presentes, principalmente, em Heisenberg e Born. Contudo, mesmo amplamente aceita, muitos se opuseram à interpretação apresentada e à completude da MQ, buscando apresentar fragilidades tanto matemáticas quanto conceituais-interpretativas. Um dos principais argumentos críticos à MQ a se destacar foi

elaborado por Einstein, Podolsky e Rosen (1935), conhecido como argumento, ou paradoxo, EPR. O argumento busca demonstrar que a MQ é uma teoria incompleta a partir da análise de um experimento mental proposto.

Para este propósito, vamos supor que temos dois sistemas, I e II, que permitimos interagir do tempo  $t=0$  até  $t=T$ , após o qual supomos que não há mais nenhuma interação entre as duas partes. Supomos ainda que os estados dos dois sistemas antes de  $t=0$  eram conhecidos. Podemos, então, calcular com a ajuda da equação de Schrödinger, o estado do sistema combinado I + II em qualquer momento subsequente; em particular, para qualquer  $t>T$ . Vamos designar a função de onda correspondente por  $\Psi$ . Não podemos, no entanto, calcular o estado em que qualquer um dos dois sistemas é deixado após a interação. Isso, de acordo com a mecânica quântica, pode ser feito apenas com a ajuda de outras medições, por um processo conhecido como a redução do pacote de onda (EINSTEIN et al., 1935, p. 779).

Para determinar o estado em que um dos sistemas é deixado após a interação é necessário realizar uma nova medição. Com isso, os autores argumentam que o possível estado do sistema II depende de uma medição do sistema I. Ao escolher qual grandeza medir no sistema I, instantaneamente, um estado seria definido para o II, caso esse estado já não existisse antes. Portanto, ainda que implicitamente, o argumento está montado sobre a impossibilidade de se transmitir qualquer informação instantaneamente – o que violaria a Teoria da Relatividade Especial. Em outras palavras, o argumento assume a noção de localidade nas interações físicas.

No mesmo ano em que o artigo contendo o argumento EPR é publicado, Niels Bohr publica uma resposta na mesma revista, *Physical Review*, rebatendo as críticas de Einstein e buscando defender o ponto de vista da complementaridade. Bohr segue argumentando que a aparente contradição revela uma inadequação da perspectiva da filosofia natural para uma explicação racional dos fenômenos da Mecânica Quântica. Após apresentar novamente as considerações da teoria, Bohr (1935b, p. 699) reafirma sua posição:

[...] nos fenômenos em questão, não estamos lidando com uma descrição incompleta caracterizada pela seleção arbitrária de diferentes elementos da realidade física ao custo de sacrificar outros tais elementos, mas com uma discriminação racional entre arranjos experimentais essencialmente diferentes e procedimentos que são adequados para um uso inequívoco da ideia de localização do espaço, ou para uma aplicação legítima do teorema de conservação do momento.

Ou seja, para Bohr, o argumento EPR trata a Mecânica Quântica como incompleta devido a essa concepção de escolha arbitrária entre um elemento da realidade em detrimento de outro. No entanto, para o autor, essa é uma escolha racional entre diferentes condições impostas ao fenômeno que se deseja observar e que satisfaz a critérios físicos fundamentais, como a

localização espacial e a conservação de momento. Tanto os argumentos elaborados por Einstein, Podolsky e Rosen quanto as respostas de Bohr se mantêm praticamente os mesmos desde as primeiras discussões entre Einstein e Bohr acerca da natureza da Mecânica Quântica, como as relatadas por Heisenberg em uma das conferências de Solvay (HEISENBERG, 1996). Assim, temos a continuidade do famoso debate entre Einstein e Bohr, que segue até o fim da vida do físico alemão. Bunge (1979, p. 205) denomina de “debate do século” esse confronto entre os dois cientistas e ainda afirma que ambos venceram suas respectivas rodadas:

[...] acontece que acredito que nem ele [Bohr] nem Einstein alcançaram uma vitória completa, mas que cada um ganhou uma rodada. Este artigo argumenta que Bohr estava certo ao sustentar que a mecânica quântica é probabilística, tem um valor duradouro e é improvável que seja substituída ou derivada de uma teoria clássica ou neoclássica. E também argumenta que Einstein estava certo ao exigir que todos os componentes subjetivistas fossem extrusados de teorias físicas.

Contudo, nos parece que a visão de Bunge sobre as contribuições do EPR é um tanto quanto reducionista. De fato, o anseio de Einstein em extirpar os componentes subjetivistas das teorias físicas é uma característica a se destacar. No entanto, sua maior contribuição talvez seja a identificação, mesmo que não intencional, do fenômeno mais peculiar da teoria quântica, a não-localidade.

Em suma, Einstein, Podolsky e Rosen (1935) buscaram estabelecer um caráter realista local à MQ, no entanto, seu argumento revela o fenômeno do emaranhamento quântico. Tal fenômeno serve, posteriormente, como base para os trabalhos de Bell (1964) e a defesa da TQ como uma teoria essencialmente não local, o que contraria as intenções iniciais do argumento EPR. Após o embate de Einstein e Bohr, há um abafamento das questões relacionadas aos fundamentos da MQ, e essa discussão só volta à “superfície” da Física na década de 1970, em especial a partir dos trabalhos de Bell (FREIRE JR., 2011). No entanto, mesmo que, em partes, silenciadas, as discussões sobre os fundamentos da MQ continuaram presentes nas ideias dos físicos. Como exemplo disso, já indicamos a interpretação de David Bohm em termos de variáveis ocultas na década de 1950. O trabalho de Bohm adentra na história da TQ como um marco contra a interpretação usual da teoria, evidenciando a necessidade de se discutir os seus fundamentos interpretativos. Assim, embora sujeito a críticas, o trabalho de Bohm possui o mérito de ter mantido viva, em maior ou menor grau, a discussão acerca do que fundamenta a TQ, influenciando uma posterior geração de físicos a fazer o mesmo. Segundo Freire Jr. (2019) o próprio Bohm admite que, independentemente das questões do determinismo e do realismo,

o principal objetivo de seu trabalho sobre as variáveis ocultas foi possibilitar que a teoria fosse além dos limites auto impostos.

A partir do exposto, podemos concluir que a TQ foi uma teoria desenvolvida a múltiplas mãos, unificando esforços de diferentes grupos de cientistas com diferentes perspectivas filosóficas e epistemológicas em busca de uma explicação para os fenômenos microscópicos. Esse cenário de controvérsias quanto aos fundamentos da MQ chega à segunda metade do século XX sem uma solução definitiva, com duas fortes linhas, a complementaridade e o realismo local, estimulando uma nova geração de físicos, dentre eles David Bohm, na busca por uma possível solução.

### **3.2 Aspectos biográficos de David Bohm**

Apaixonado pelo mundo e pela humanidade, estudante prodígio, refugiado político e um dos grandes cientistas do século XX, David Bohm foi um importante físico norte-americano responsável por elaborar diferentes interpretações para a Teoria Quântica e fazer significativas contribuições para o estudo do plasma e do núcleo atômico. O trabalho com essa nova interpretação da MQ pode ser considerado um dos mais famosos de Bohm, entretanto, sua atuação não se restringiu a isso. Bohm lecionou na Universidade de Princeton, na Universidade de São Paulo e na Universidade de Londres – Birkbeck, além de ter atuado como pesquisador no Instituto de Tecnologia da Califórnia, na Universidade da Califórnia – Berkeley, no Instituto de Tecnologia de Israel e na Universidade de Bristol.

Suas contribuições para a Física teórica vão desde os estudos acerca do núcleo atômico, sob supervisão de seu orientador, Julius Robert Oppenheimer, levando-o a estudos com o plasma, até suas pesquisas nos fundamentos da MQ, por meio das quais elaborou diferentes formas de se compreender a realidade quântica, da causalidade à totalidade do universo. Paralelamente à atividade científica, a vida de Bohm foi permeada por conflitos familiares e políticos que resultaram na sua fuga dos Estados Unidos devido à repressão do macartismo<sup>8</sup>. Após fugir do país, Bohm viveu durante cinco anos no Brasil, depois mudou-se para Israel e, por fim, para a Inglaterra, onde viveu até falecer, em 22 de outubro de 1992.

Olival Freire Jr., físico e historiador da ciência, é autor de uma das biografias de David Bohm, que já no título o define como “*a life dedicated to understanding the Quantum World*”

---

<sup>8</sup> Regime imposto pelo presidente Joseph McCarthy durante a guerra fria que monitorava e prendia supostos espiões soviéticos.

(2019). Segundo o pesquisador, a vida de Bohm pode ser dividida em três períodos distintos, marcados por severas mudanças conceituais no seu modo de compreender a Teoria Quântica e o mundo. O primeiro vai até aproximadamente 1951, quando as concepções do cientista estavam fortemente alinhadas com as da interpretação da complementaridade de Niels Bohr. No segundo período, que se estende até aproximadamente o fim da década de 1950, o cientista elabora e argumenta em favor de uma interpretação causal para a MQ em termos de variáveis ocultas. No terceiro período, que vai até o final de sua vida, o cientista engendra uma nova interpretação a partir dos conceitos de ordem implicada e totalidade. Ainda, no final desse último período, ele busca relacionar sua interpretação causal com sua noção de ordem e totalidade.

David Joseph Bohm nasceu no dia 20 de dezembro de 1917 na cidade de Wilkes-Barre, Pensilvânia, Estados Unidos. A cidade era composta, em sua maioria, por mineiros que trabalhavam nos arredores na extração de carvão. Quando ele estava prestes a completar 12 anos, ocorreu a maior crise econômica em toda a história americana. A quebra da bolsa de 1929 afetou severamente a cidade, causando desemprego em massa e, conseqüentemente, miséria. A situação da comunidade fez com que Bohm se engajasse na luta política pela reivindicação dos direitos dos trabalhadores e por melhores condições de trabalho em Wilkes-Barre. Além da atuação política, o ambiente familiar do cientista durante sua juventude era conturbado. Seu pai, Samuel Bohm, um imigrante da região da Hungria, era um homem constantemente irritado e violento que tinha frequentes ataques de fúria, o que se agravou muito com a crise. Sua mãe, Frieda Bohm, imigrante da região da Lituânia, apresentava severos problemas psicológicos, muitos deles originados na imigração para os Estados Unidos, pelas dificuldades com a nova língua/cultura, e outros na sua relação com Samuel (FREIRE JR., 2019).

Mesmo em um ambiente conturbado, o jovem David sempre demonstrou um grande interesse pela ciência. Suas primeiras aproximações com o tema surgiram de suas leituras da *Amazing Stories*, uma famosa revista de ficção científica dos Estados Unidos na época. Um dos episódios que marcaram Bohm foi intitulado “The Columbus of Space”. A revista conta a história de um foguete chamado Vênus que explora o espaço, escrita por Garrett Putnam.

Durante seu período escolar, na G. A. R. Memorial Junior/Senior High School, o jovem Bohm, apelidado de Einstein pelos colegas, demonstrava um desempenho acima da média, sendo descrito como alguém com uma “visão profunda em inteligências, ideias, átomos, influências” (FREIRE JR., 2019, p. 21). Mais tarde, ele ingressa no Pennsylvania State College para estudar Física. Em 1939 começa sua pós-graduação no Instituto de Tecnologia da



Califórnia e, em 1941, inicia seu doutorado em Berkeley, na Universidade da Califórnia, sob orientação do professor Julius Robert Oppenheimer (diretor do projeto Manhattan e responsável por criar a bomba atômica). Assim que Bohm chega na instituição, Oppenheimer já lhe apresenta um problema de pesquisa, o espalhamento de prótons e nêutrons, ao qual ele se dedica tão intensamente que, ao concluir, encontra-se exausto e deprimido (FREIRE JR., 2019). Após apresentar seus resultados, muito apreciados por Oppenheimer, pelas circunstâncias da guerra, a pesquisa de Bohm é imediatamente classificada como de interesse militar. Mesmo não tendo interesse em pesquisas com fins militares, seu trabalho acaba por adquirir enorme relevância para a indústria militar, o que impede o cientista de defender e publicar sua tese. Segundo Freire Jr. (2019, p. 38), uma situação inusitada aconteceu:

Ele era um aluno de doutorado que não conseguia analisar os resultados de suas próprias pesquisas nem apresentá-los como requisito para o diploma de doutorado. O problema foi resolvido com Oppenheimer testemunhando à administração de Berkeley sobre a qualidade do trabalho e Berkeley concedendo a Bohm um título de doutor sem a apresentação de uma tese de doutorado.

Posteriormente, Oppenheimer se torna muito mais que um orientador para Bohm. Ambos de descendência judia, compartilhavam uma infância difícil, eram introspectivos e permeados por melancolia (PEAT, 1996). Ao descrever a relação entre os dois, Peat (1996, p. 40) destaca que:

Os sentimentos de Bohm por Oppenheimer se estendiam além da admiração para o que ele mais tarde descreveu como amor. Aqui estava alguém que não só entendia as paixões do intelecto de Bohm, mas também lhe oferecia incentivo e apoio. Era inevitável que uma parte da natureza de Bohm olhasse para Oppenheimer, treze anos mais velho, como um pai protetor e compreensivo.

Muito além da influência de Oppenheimer em Bohm, temos a influência de Julius em David, uma influência que ultrapassa a teórica intelectual. Com a figura de J. Robert, David teve correspondidas suas paixões intelectuais, seus traumas, suas dores e melancolias. Talvez tenha sido com Oppenheimer que Bohm aprendeu a seguir sua paixão pelo conhecimento.

Após obter seu Ph.D., Bohm começa a trabalhar no laboratório de radiação em um novo ciclotron adquirido, chamado de calutron, que também possuía fins militares. O principal uso militar do trabalho era a utilização de feixes de íons para obter isótopos de urânio-235, empregados para se obter energia nuclear e, com isso, bombas nucleares. O trabalho com o equipamento, ou pelo menos parte dele, foi expresso por meio de algumas publicações (BOHM;

FOLDY, 1946), mas sua principal influência na vida do cientista foi ter direcionado suas pesquisas para o estudo do plasma<sup>9</sup>.

Enquanto desenvolve suas primeiras investigações relacionadas ao plasma, Bohm começa a lecionar na Universidade de Princeton, onde encontra um ambiente adequado para suas pesquisas. Em 1949, ele e seus colegas (BOHM et al., 1949a; 1949b) encontram um método para a difusão do plasma a partir de um campo magnético, o que leva o cientista a novos estudos com seus orientandos de doutorado na replicação desse método para demais meios materiais. Os cientistas, a partir do estudo de arcos de plasma para a separação de isótopos de urânio (1949b), utilizam uma expressão aproximada para essa difusão do plasma, hoje conhecida como difusão de Bohm, dada por

$$D_{\perp} = \frac{1}{16} \frac{(KT_e)}{eH} \quad (1)$$

Onde D é o coeficiente de difusão, T é a temperatura e H é o campo magnético.

Bohm e Gross (1949d; 1949e) publicam dois artigos apresentando a teoria da oscilação para o plasma através da teoria de muitos corpos, que busca descrever o plasma em termos da aproximação das equações de movimento para muitos corpos. Sobre o trabalho, Gross (1987, p. 46) comenta: “A principal ferramenta de análise foi a linearização das equações de movimento para operadores de produtos de criação e aniquilação por meio da aproximação de fase aleatória”. Assim, Bohm enfrenta o problema da análise dos comportamentos coletivos *versus* individuais, que, junto da natureza dual das entidades quânticas, se tornam o cerne de suas investigações.

Posteriormente, Bohm e David Pines, seu orientando de doutorado, estendem o método desenvolvido (BOHM et al., 1949a; 1949b) para o estudo de metais como sendo um gás denso através da inserção de variáveis auxiliares (BOHM; PINES, 1951a; 1951b; 1953). Nas palavras de Gross (1987, p. 48):

Ele não estava satisfeito com a abordagem das equações de movimento da teoria dos muitos corpos. Ele sentiu que era necessária uma descrição que tratasse de aspectos coletivos e individuais simultaneamente. Isso levou ao sucesso da teoria das variáveis auxiliares de Bohm e Pines.

---

<sup>9</sup> O plasma é um dos estados da matéria, junto à tríade comumente conhecida de sólido-líquido-gasoso, onde temos um gás ionizado em uma altíssima temperatura que apresenta propriedades peculiares. Na época, os estudos do plasma existentes não davam conta de explicar seus estranhos comportamentos. Foi então que Bohm decidiu seguir por esse ramo.

A partir disso, Pines estende essa aproximação para o estudo de metais supercondutores, física nuclear, superfluidos, dentre outros tópicos, que, posteriormente, é chamado de “aproximação de fase aleatória” (FREIRE JR., 2019).

Além das pesquisas em tópicos na fronteira da Física, ao chegar em Princeton, Bohm se aproxima do físico alemão Albert Einstein, com o qual compartilha, ao longo dos anos, interesses a respeito dos fundamentos da Física. Bohm leciona na Universidade de Princeton durante a década de 1940, sendo interrompido pelos conflitos políticos em 1949. O que podemos analisar de sua experiência enquanto docente em Princeton consiste, basicamente, no livro didático *Quantum Theory* e no relato de ex-alunos.

Em novembro de 1942 Bohm filia-se ao partido comunista americano, entretanto, é difícil dizer o quão engajado foi e por quanto tempo permaneceu ativo (FREIRE JR., 2019). Ele então começa a ser observado pelo departamento de segurança americano, vítima do regime imposto pelo senador Joseph McCarthy. Bohm foi intimado a depor inúmeras vezes contra Oppenheimer, seu mentor intelectual, e sempre se recusou a falar. Perguntas a respeito de outros membros do partido na busca por espões soviéticos eram igualmente frequentes, mas Bohm também se recusou a respondê-las. A pressão política era tanta que, em 4 de dezembro de 1950, Bohm é preso como suspeito de conspirar contra o congresso e, no mesmo dia, a Universidade de Princeton emite um comunicado afastando-o de todos os seus afazeres. Em 31 de março de 1951, ele é solto, no entanto, a Universidade não renova seu contrato. Oppenheimer recomenda que Bohm fuja do país, afirmando que sua vida corre perigo nos Estados Unidos (FREIRE JR., 2019).

Bohm então se vê obrigado a abandonar o país. Graças à ajuda de seus companheiros brasileiros em Princeton, Jayme Tiomno e Leite Lopes, além de recomendações do próprio Einstein, ele consegue um cargo de professor na Universidade de São Paulo entre 1951 e 1955. Porém, um mês após sua chegada, o cientista tem seu passaporte confiscado pela embaixada americana, sendo obrigado a solicitar uma cidadania brasileira para poder continuar no Brasil. Bohm leciona MQ no recém-formado Instituto de Física da Universidade de São Paulo, trabalhando em conjunto com a primeira grande geração de físicos brasileiros. Nesse período, sente-se desconfortável com a situação e chega a afirmar que o Brasil é extremamente pobre e não tão tecnicamente avançado quanto os Estados Unidos (FREIRE JR., 2019). Assim, Bohm não tem o menor interesse em permanecer no país por um longo período, mas acredita no potencial da Física brasileira. Segundo Freire Jr. (2019, p. 78), em uma correspondência com

Einstein, ele escreve: “A universidade é bastante desorganizada, mas isso não causará problemas no estudo da física teórica. Existem vários bons alunos aqui, com os quais será bom trabalhar”.

Movido por suas inquietações, adquiridas ao longo de suas pesquisas no plasma, pelos debates filosóficos acerca dos fundamentos da MQ com seus colegas e alunos e pelos estudos de MQ como estágio preparatório para a atividade docente, Bohm elabora sua interpretação causal para a teoria, o que culmina, em 1952, na publicação de dois artigos contendo essa nova interpretação (BOHM, 1952a; 1952b), o que, posteriormente, se torna um marco em sua trajetória acadêmica, levando-o a palestrar sobre o tema em diferentes universidades e eventos. Mesmo que alvo de diversas críticas na época, muitos ainda se interessavam pelas conclusões obtidas no trabalho, o que o popularizou ainda mais nos meios acadêmicos.

Para compreendermos a originalidade de Bohm, precisamos primeiro compreender a diferença entre MC e MQ, assim como o papel de suas respectivas equações centrais. Em MC, a partir da equação de Newton,  $F = m \cdot a$ , podemos descrever o comportamento dos corpos e determinar com altíssima precisão os eventos futuros que decorrem de seu movimento. No entanto, em MQ temos uma equação semelhante para a descrição do comportamento de um sistema, chamada de Equação de Schrödinger (3), que nos permite descrever, mas não determinar com precisão absoluta, o comportamento desse sistema. O que obtemos com a equação de Schrödinger é a chamada “função de onda”, que, a partir da interpretação de Max Born, nos dá apenas a densidade de probabilidade de encontrarmos a partícula regida por essa função em determinada região do espaço.

No primeiro artigo, Bohm começa apresentando a interpretação usual da MQ como sendo autoconsistente, mas envolvendo suposições que não podem ser testadas experimentalmente, visto que o tratamento mais completo e específico que pode ser dado a um sistema individual se dá em termos da função de onda, que determina apenas os possíveis resultados dos processos de medição. O autor também faz menção ao argumento de Einstein de que a mecânica quântica é incompleta, mesmo tendo essa autoconsistência, apresentando e discutindo sobre o argumento EPR, ou o *Gedankenexperiment* elaborado por Einstein, Podolsky e Rosen (1935a), que busca por uma expressão que descreva por completo o estado de um sistema. Assim, para tratar do problema, Bohm sugere a investigação em torno de uma nova interpretação da MQ que se dá a partir da inserção de variáveis ocultas, que, por sua vez, seriam as variáveis que determinam precisamente os valores de momento e posição de sistema individuais (BOHM, 1952a).

Partindo de uma função de onda complexa geral (2), que deve satisfazer a equação de onda de Schrödinger (3), sendo R e S reais

$$\psi = Re^{\frac{iS}{\hbar}} \quad (2)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi \quad (3)$$

Verifica-se que a primeira derivada parcial em função do tempo (4) e a segunda derivada parcial em função da posição (5) são:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = i\hbar \frac{\partial R}{\partial t} - \frac{R \partial S}{\partial t} \quad (4)$$

E

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} + \frac{R}{2m} \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 - \frac{i\hbar R}{2m} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \frac{i\hbar}{m} \frac{\partial R}{\partial x} \frac{\partial S}{\partial x} \quad (5)$$

Substituindo (4) e (5) na equação de Schrödinger (3), e separando a parte real e imaginária, obtemos as seguintes expressões para R e S:

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{2m} [R \nabla^2 S + 2 \nabla R \nabla S] \quad (6)$$

E

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\left[ \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(x) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \right] \quad (7)$$

Tomando a densidade de probabilidade  $P(x) = R^2$ , ou,  $R = P^{\frac{1}{2}}$ , obtemos:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \left( \frac{P \nabla S}{m} \right) = 0 \quad (8)$$

E

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(x) - \frac{\hbar^2}{4m} \left[ \frac{\nabla^2 P}{P} - \frac{(\nabla P)^2}{2P^2} \right] = 0 \quad (9)$$

A partir disso, Bohm reconhece a equação (9) como análoga à equação de Hamilton-Jacobi (10) para a Mecânica Clássica. Se definirmos  $Q = -\frac{\hbar^2}{4m} \left[ \frac{\nabla^2 P}{P} - \frac{(\nabla P)^2}{2P^2} \right]$ , denominado por Bohm (1952 a) de “potencial quântico”, a equação de Hamilton-Jacobi é escrita como:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + Q + V = 0 \quad (10)$$

Dessa forma, a equação de movimento para uma partícula sob tal influência pode ser escrita em função de S como:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\nabla \left[ V(x) - \left( \frac{\hbar}{2m} \right) \frac{1}{R} \nabla^2 R \right] \quad (11)$$

E, assim, o momento

$$m \frac{\partial x}{\partial t} = \nabla S(x) \quad (12)$$

Dessa forma, Bohm encontra uma expressão para o movimento de uma partícula na qual é possível considerar uma ação além do potencial clássico. Nela, a equação (12) nos permite encontrar os valores de velocidade e momento, e a equação (8) nos garante a conservação da

probabilidade. Ainda, o autor ressalta que esse potencial não afeta as descrições feitas no nível quântico, mas tem crucial importância nas investigações acerca de domínios menores.

Após apresentar sua proposta de nova interpretação (1952a; 1952b), Bohm a aplica para diferentes problemas da MQ (o estado estacionário, os estados onde o momento angular é diferente de zero, o espalhamento, a transição entre órbitas, o argumento EPR), demonstrando que ela condiz com os resultados já obtidos pela interpretação anterior. Sobre a interpretação de Bohm, Jammer (1988, p. 693, grifo do autor) pontua:

Bohm interpreta [ $P = |\psi|^2$ ] como a probabilidade de a partícula *estar* na posição definida pelo argumento  $x$  de  $(x)$  e não, como Born o concebeu, como a probabilidade de *encontrar* a partícula naquela posição se realizada uma medição adequada. Por mais sutil que seja essa distinção, ela indica a intenção de Bohm de construir uma teoria realista e independente do observador e de sua consciência.

Por fim, Bohm argumenta em favor de uma alternativa à hipótese positivista lógica de que a realidade é apenas o que podemos medir e observar. Sua hipótese consiste em assumir que o mundo como um todo é objetivo e real e, na medida do que sabemos, pode ser tratado como tendo uma descrição precisa e estrutura analisável de ilimitada complexidade. Posteriormente, ele afirma que recuperar o determinismo não era sua principal motivação, mas, sim, possibilitar que a teoria fosse além dos fenômenos e das aparências. “Posteriormente em sua carreira, Bohm (1987, p. 33) enfatizou que recuperar o determinismo não era sua principal motivação e que sua maior insatisfação era que ‘a teoria não poderia ir além dos fenômenos ou aparências’” (FREIRE JR., 2015, p. 22).

Em 1955, Bohm muda-se para Israel, onde desenvolve suas pesquisas no Instituto de Tecnologia de Israel, e, posteriormente, em 1957, passa a residir na Inglaterra até o fim de sua vida. Na Inglaterra, chega à cidade de Bristol para assumir uma bolsa de pesquisa durante quatro anos. Após esse período, muda-se para Londres e assume o cargo de professor permanente no Birkbeck College da University of London, afirmando, mais tarde, que se sentia muito desconfortável com o clima tenso e desagradável em Bristol. Ainda, no final dos anos 1950, rompe com a ideologia soviética e, com isso, com o marxismo. No entanto, a causalidade ainda permanece presente nos seus pensamentos por algum tempo.

Ao final desse período e dos anos seguintes em Israel, Bohm, já na Inglaterra, publica o livro *Causalidade e acaso na Física Moderna* (1957). Na obra, ele apresenta suas ideias a respeito da FM a partir de uma discussão a respeito da filosofia mecanicista da FC, indicando o surgimento da Teoria Quântica como uma quebra nessa filosofia e a interpretação de Copenhague como uma tentativa de se resgatar tal mecanicismo. Bohm define a interpretação

do grupo de Copenhague como sendo um mecanicismo indeterminista, em que, diferentemente da FC, o mecanismo da natureza não pode ser determinístico, mas continua sendo um mecanismo. Nisso, a interpretação usual nos faz abdicar dos conceitos de continuidade e causalidade. Bohm apresenta novamente uma interpretação alternativa para a MQ, dessa vez um pouco diferente da proposta original das variáveis ocultas. Nela, o cientista ainda parte da ideia de variáveis ocultas, mas a direciona para a concepção de um nível subquântico, o qual originaria as descontinuidades e os indeterminismos da Teoria Quântica.

Frente a essas duas descrições, temos uma visão geral do contexto extraverbal do enunciado didático de Bohm, primeiro centrado no mundo da cultura – os enunciados da TQ respondidos – e depois no mundo da vida – as experiências vividas por ele nos primeiros momentos de sua carreira acadêmica. A partir disso, no próximo capítulo, adentramos na análise do enunciado didático do livro *Quantum Theory* (1951) e na interpretação metalinguística dos seus aspectos discursivos e epistêmicos. De qualquer sorte, é possível perceber, pela breve exposição de alguns aspectos da biografia de nosso autor, o quanto estão profundamente imbricados desde o início, em sua atividade intelectual, aspectos investigativos que dizem respeito ao estatuto investigativo-científico da Física com preocupações nitidamente formativas, no sentido de como inserir pedagogicamente o estudante no universo científico da Física e seu significado para a compreensão da matéria e do universo.



## 4 ANÁLISE DO ENUNCIADO DIDÁTICO DE BOHM NO LIVRO *QUANTUM THEORY*

No presente capítulo é apresentada a análise do livro didático *Quantum Theory* (1951) a partir da óptica da filosofia de Mikhail Bakhtin.

### 4.1 Descrição geral do enunciado

Após a segunda guerra mundial, Bohm assume um cargo na Universidade de Princeton como professor, lecionando inicialmente para estudantes *undergraduate* (equivalente à graduação no Brasil), e rapidamente é movido para os estudantes *graduate* (equivalente à pós-graduação no Brasil). Sobre essa experiência docente, Peat (1996) descreve uma severa mudança no estilo de suas aulas. De início, Bohm apresenta um estilo confuso e pouco efetivo, segundo o autor, ao centrar suas aulas no quadro negro, derivando equação em frente ao quadro e dificultando a observação dos estudantes. Ainda, o cientista constantemente deduzia e apagava equações antes mesmo que seus estudantes pudessem observá-las.

Ao mudar para o curso de pós-graduação, Bohm aperfeiçoa seu estilo e encontra uma forma de inspirar os estudantes. Peat (1996, p. 74) retoma as memórias de Kenneth Ford, aluno de Bohm na época, que afirma que o seu novo estilo não se resumia às usuais técnicas de resolução de problema, contendo diversas indagações e discussões acerca da TQ em si e suas implicações: “Seu estilo de ensino intenso e absorvente deu à classe uma sensação de unidade, na qual todos se sentiram à vontade e capazes de expressar suas perguntas”. Assim, Bohm diferenciava-se dos demais professores de Princeton devido a sua proximidade e acessibilidade aos estudantes.

Os materiais elaborados por Bohm para se preparar para a disciplina posteriormente foram compilados na forma de livro didático (1951). Sobre o livro e o início de sua carreira docente, Freire Jr. (2019, p. 47) afirma:

Não sabemos muito sobre como Bohm preparou o livro, apenas que ele trouxe suas inclinações bohrianas para Princeton no que diz respeito à interpretação da mecânica quântica, que foi resultado de conversas com Joseph Weinberg e sua mistura de complementar e dialética e de o ambiente intelectual geral em torno de Oppenheimer em Berkeley.

No prefácio da obra, Bohm (1951) indica que uma apreciável parte dos materiais utilizados na elaboração do livro foi sugerida pelos apontamentos feitos por J. Oppenheimer em uma série de aulas ministradas na Universidade da Califórnia. Menciona, também, uma série de aulas de Niels Bohr intitulada “Teoria Atômica e a descrição da natureza” como sendo o subsídio para a base filosófica necessária à “compreensão racional da teoria quântica” (BOHM, 1951, p. 9). Ainda, agradece as discussões com os estudantes e, em especial, aos alunos da classe de 1947 e 1948 pela ajuda na revisão das formulações matemáticas. Dito isso, podemos identificar a obra de Bohm (1951) como sendo orientada por Oppenheimer, seu mentor, por suas inclinações bohrianas e pelo diálogo com seus estudantes, na busca por uma apresentação consistente da teoria quântica.

Considerando que a TQ foi desenvolvida no primeiro quarto do século XX (FREIRE JR., 2011), com significativos desenvolvimentos teóricos na década de 1930, o trabalho de Bohm em se preparar para ensinar esses recentes desenvolvimentos na década de 40 era um grande desafio. Ele encontra uma boa abordagem a partir do princípio da correspondência de Bohr, introduzindo a FQ a partir de pontos específicos da FC, sempre buscando demonstrar os fenômenos quânticos descontínuos como aproximações que, quando consideradas em grande escala, resultam nos fenômenos clássicos contínuos.

Vamos fazer, nesta seção, uma apresentação geral sobre o livro e, na sequência, “interpretar” algumas características fundamentais do enunciado. De início, observamos uma diferenciação entre a formulação física e a matemática da TQ, sendo a primeira uma formulação conceitual com articulações matemáticas simplificadas, e a segunda, a abordagem matemática formal da teoria. Ainda no prefácio, Bohm (1951, p. iv) indica que:

De acordo com o plano geral delineado acima, ênfase incomum é colocada (especialmente na Parte I) em mostrar como a teoria quântica pode ser desenvolvida de uma forma natural, começando da teoria clássica previamente existente e indo passo a passo através dos fatos experimentais e linhas teóricas de raciocínio que levaram à substituição da teoria clássica pela teoria quântica. Dessa forma, evita-se a necessidade de introduzir os princípios básicos da teoria quântica em termos de um conjunto completo de postulados matemáticos abstratos, justificado apenas pelo fato de que cálculos complexos baseados nesses postulados coincidem com o experimento.

Isto é, ao invés de apresentar a TQ a partir da postulação de conceitos e equações abstratas, Bohm parte dos problemas clássicos e de suas abordagens clássicas para demonstrar a necessidade do surgimento de uma nova teoria que dê conta dos fenômenos microscópicos (quânticos). Assim, encontramos um primeiro enunciado para a TQ na parte I da obra a partir de uma abordagem físico-conceitual, centrada na realidade concreta, dando ênfase à articulação

entre os conceitos clássicos que fundamentam o surgimento da teoria e visando construir uma transição entre os fundamentos da FC e os da FQ.

Na segunda parte da obra, Bohm introduz os abstratos conceitos matemáticos característicos da TQ, fundamentados na construção conceitual feita na primeira parte. A partir disso, ele segue para a terceira parte da obra, na qual, tendo em vista os fundamentos matemáticos introduzidos anteriormente, adentra nos casos específicos da MQ. Frente a tais problemas, explora na parte seguinte alguns métodos para a solução da equação de Schrödinger e, na próxima, dedica-se a uma breve discussão sobre as teorias do espalhamento. Por fim, elabora, na última parte da obra, a tentativa de se construir uma TQ dos processos de medição, quando aborda diretamente os problemas relacionados aos fundamentos da Física, indicando suas possíveis soluções.

A partir disso, temos uma primeira noção da estrutura composicional do enunciado de Bohm, que será discutida de maneira mais aprofundada na seção destinada à interpretação metalinguística dos elementos nele presentes. Antes de adentrarmos nesses tópicos, seguimos por uma descrição geral do enunciado, destacando a primeira parte da obra, na qual se tem a enunciação da TQ, partindo do seu surgimento frente às necessidades advindas de experimentos e problemas clássicos.

O primeiro passo para Bohm é indicar o problema do equilíbrio da distribuição de radiação eletromagnética em uma cavidade oca, ou o problema da radiação do corpo negro, como, historicamente, o início da TQ. Buscando solucionar o problema por meio da lei clássica de Rayleigh-Jeans para a distribuição de radiação, ele demonstra que a aproximação da lei leva a resultados contraditórios quando comparada com os resultados experimentais. A partir disso, indica a hipótese de Planck sobre a quantização dos osciladores de radiação como sendo a mais condizente com os resultados experimentais e conclui que todos os sistemas em que a radiação eletromagnética oscila harmonicamente são quantizados seguindo a expressão  $E = n \cdot h \cdot \nu$ , indicando que, se assumirmos que todos os sistemas podem interagir entre si, então, a quantização de um tipo de oscilador harmônico requer a quantização de todos os outros tipos.

Na sequência, nos desenvolvimentos posteriores da TQ (capítulo 2), Bohm afirma que as restrições quânticas para as energias permitidas em um oscilador harmônico, junto do desenvolvimento lógico e sistemático da hipótese quântica, levam à conclusão de que toda matéria está sujeita a tais restrições quânticas. Para demonstrar o percurso de amadurecimento histórico dessas ideias, que culminam na fusão entre a TQ e a Física Atômica nos trabalhos de Bohr e Sommerfeld, Bohm começa pelo problema do efeito fotoelétrico, discutido no famoso

trabalho de Einstein (1905), tido como o marco inicial da TQ. Nele, Einstein busca aproximar a ideia de quantização dos osciladores de radiação para a interação entre radiação e matéria, demonstrando que essa interação também obedece à restrição de quantização.

Bohm segue no capítulo discutindo a respeito da diferença entre as leis clássicas contínuas e as leis quânticas descontínuas, apresentando a natureza probabilística de um determinismo incompleto da TQ. Ele chega, assim, ao enunciado do princípio da correspondência de Bohr, que subsidia boa parte dos fundamentos filosóficos empregados no livro. Nas palavras de Bohm (1951, p. 31):

Este princípio afirma que as leis da física quântica devem ser escolhidas de forma que no limite clássico, onde muitos quanta estão envolvidos, as leis quânticas conduzam às equações clássicas como uma média. O problema de satisfazer o princípio da correspondência não é nada trivial. Na verdade, o requisito de satisfazer o princípio da correspondência, combinado com a indivisibilidade, a dualidade onda-partícula e o determinismo incompleto, será visto como definindo a teoria quântica de uma maneira quase única.

A partir disso, ainda no capítulo dois, Bohm parte para as evidências experimentais, i.e., o efeito Compton, que leva a ideia de quantização para todos os sistemas materiais. Introduce, com isso, os trabalhos de Bohr acerca da quantização do momento angular e dos níveis de energia discretos que podem ser assumidos por um átomo de hidrogênio.

Assim, Bohm chega à teoria de Bohr-Sommerfeld para as condições de quantização (ou a extensão de Sommerfeld do modelo de Bohr), no qual se tem uma variável de ação, em analogia à variável de ação da FC, órbitas circulares e elípticas com energias e momentos discretos. Para demonstrar a pertinência da teoria de Bohr, o autor apresenta os experimentos de Franck-Hertz, cujos resultados corroboram as previsões bohrianas. O capítulo é encerrado com a unificação entre TQ e Física Atômica, sendo o estudo da natureza da matéria parte da TQ. O período geral apresentado no capítulo 2 vai, aproximadamente, de 1905, com o trabalho de Einstein, até 1916, com a extensão de Sommerfeld do modelo de Bohr.

Nos capítulos 3 e 4, Bohm apresenta a formulação ondulatória para a MQ e a interpretação probabilística. A partir da noção de pacote de ondas, ele chega à hipótese de De Broglie a respeito dos pacotes de onda de elétrons e, conseqüentemente, à formulação ondulatória para a estrutura da matéria com a ideia de que cada nível de energia permitido pelo átomo de Bohr possui uma frequência correspondente.

Após o desenvolvimento da teoria do átomo de Bohr e das condições quânticas de Bohr-Sommerfeld, de Broglie ficou impressionado com o fato de que a relação de Einstein  $E = h\nu$ , juntamente com o caráter discreto dos níveis de energia, parecia implicar que cada nível de energia fosse associado a uma frequência correspondente. O aparecimento de um conjunto discreto de frequências permitidas era, entretanto, um fenômeno familiar na física clássica em conexão com o movimento das ondas em compartimentos (BOHM, 1951, p. 58).

No entanto, o caminho seguido por Bohm na dedução da hipótese de De Broglie diferencia-se do elaborado originalmente em termos relativísticos. O autor elabora uma dedução a partir da relação entre velocidade de fase e velocidade de grupo de um pacote de ondas. Seguindo, faz uma comparação entre os pacotes de onda de luz e os pacotes de ondas de elétron propostos por De Broglie. Assim, chega à concepção de elétrons como sendo compostos por um conjunto de ondas agrupadas na forma de um pacote e, com isso, introduz a equação de onda de Schrodinger para a descrição desses pacotes. Bohm deduz a equação de Schrödinger em uma dimensão e dependente do tempo a partir da análise de Fourier para a propagação de uma onda.

Seguindo, ele adentra na definição de probabilidades, demonstrando mais um aspecto da interpretação usual da MQ, ao enunciar a função de onda como definidora da “probabilidade que uma partícula pode ser *encontrada* entre  $x$  e  $x + dx$ ” (BOHM, 1951, p. 81, grifo nosso). Essa forma de conceber a função de onda foi elaborada por Max Born, como menciona Jammer (1988), e consiste de um dos pontos da teoria reelaborados por Bohm.

Até esse ponto, Bohm (1951) apresenta grande parte dos desenvolvimentos iniciais da teoria, como sua fundação em problemas clássicos, o início do programa de pesquisa relacionado aos quanta, a aproximação entre TQ e Física Atômica e a interpretação ondulatória da matéria. Com isso, temos praticamente todo o estatuto inicial da MQ, restando apenas o princípio da incerteza, uma das implicações centrais da teoria<sup>10</sup>

Com base na formulação da teoria quântica obtida no trabalho anterior, passamos agora a derivar uma expressão muito importante que produz uma estimativa quantitativa das limitações na possibilidade de dar uma descrição determinística do mundo. Essa expressão, que foi dada pela primeira vez por Heisenberg, é geralmente chamada de princípio da incerteza (BOHM, 1951, p. 99).

Bohm inicia apresentando o princípio da incerteza a partir de sua implicação central, a impossibilidade de se obter uma descrição determinista do mundo natural, remetendo, assim,

---

<sup>10</sup> Posteriormente, ao adotar a visão realista na formulação de sua interpretação alternativa para a mecânica quântica, Bohm trata o Princípio da Incerteza como um dos pontos centrais da interpretação usual a ser criticado.

ao problema da medição e da determinação de distintas grandezas físicas simultâneas. Após apresentar brevemente o princípio e a prova de sua coerência, ele parte para a interpretação do princípio e a questão central que elencara. Nas palavras do próprio autor (1951, p. 100):

Podemos pensar no elétron como algo que tem, simultaneamente, valores bem definidos de posição e momento, que são incertos para nós porque não podemos medi-los com precisão total; ou devemos pensar que a falta de determinismo completo tem origem na própria estrutura da matéria?

Assim, Bohm apresenta o ponto central referente à MQ discutido em sua posterior interpretação causal: a impossibilidade de se obter, simultaneamente, valores bem definidos de duas grandezas físicas distintas é uma limitação dos processos de medição ou uma propriedade intrínseca da natureza? A resposta para o problema consiste em assumir que “o indeterminismo é inerente à própria estrutura da matéria e que o momento e a posição nem podem existir com valores simultaneamente e perfeitamente definidos” (BOHM, 1951, p. 100). Isto é, Bohm assume a interpretação de Heisenberg de uma realidade alternada na qual a existência de uma quantidade física bem determinada impede, quando medidas simultaneamente, a existência de outra quantidade física.

O problema do determinismo, ou realismo local, *versus* o indeterminismo da MQ foi abordado por Einstein, Podolsky e Rosen (1935a), como mencionado anteriormente, visando demonstrar que a falta de determinismo da MQ revela sua incompletude. Quanto à discussão referente ao princípio da incerteza, Bohm argumenta que a ideia de uma partícula possuir valores simultaneamente bem definidos de grandezas distintas é equivalente à proposição de variáveis ocultas como determinantes dessas quantidades.

A ideia de que uma partícula tem simultaneamente valores bem definidos de posição e momento, que são incertos para nós, é equivalente à suposição de variáveis ocultas (ver Cap. 2, Seção 5) que realmente determinam quais são essas quantidades em todos os momentos, mas de uma forma que, na prática, não podemos prever ou controlar com precisão total. Veremos no cap. 22, Seção 19, que a teoria quântica é inconsistente com a suposição de tais variáveis ocultas (BOHM, 1951, p. 101).

Bohm afirma que o princípio da incerteza é uma derivação lógica da suposição acerca das ondas de matéria e sua interpretação probabilística, na qual essa impossibilidade de medições simultâneas e precisas leva à necessidade de uma teoria quântica dos processos de medição. Com isso, ele adianta as discussões sobre os processos de medição, presentes de forma mais sofisticada no último capítulo da obra, em um pequeno tópico que aproxima o problema ao princípio da incerteza. Assim, o autor discute as aplicações do princípio da incerteza e suas

implicações para a atividade experimental a partir do experimento mental proposto por Heisenberg sobre o microscópio de raios gama.

Para encerrar a discussão sobre o princípio da incerteza, Bohm reflete sobre a possibilidade de inserção de variáveis ocultas na MQ, novamente adiantando as discussões do final do livro. Ele afirma que, se supormos que as variáveis ocultas realmente existem, é necessário encontrar algum resultado experimental que dependa do estado dessas variáveis, caso contrário elas não podem possuir um sentido físico. Isso, segundo o autor, ainda não foi verificado por nenhuma observação feita. No entanto, Bohm supõe que, caso tais observações surjam no futuro, será necessário reformular a Teoria Quântica de maneira fundamental, na qual essa nova teoria se aproxima da MQ como um limite.

Até que encontremos alguma evidência real para um colapso do tipo geral de descrição quântica agora em uso, parece, portanto, quase certamente inútil procurar por variáveis ocultas. Em vez disso, as leis da probabilidade devem ser consideradas como fundamentalmente enraizadas na própria estrutura da matéria (BOHM, 1951, p. 115).

Assim, Bohm rejeita a proposição de variáveis ocultas ao tratar do princípio da incerteza, ficando ao lado da interpretação probabilística da matéria. A discussão sobre as variáveis ocultas continua no capítulo que encerra a obra. Antes de adentrarmos nessa discussão final, nos atemos aos três últimos capítulos da primeira parte do livro, onde o autor continua a enunciar a Teoria Quântica a partir de sua formulação física.

No capítulo seis, Bohm compara as propriedades ondulatórias e corpusculares da matéria, demonstrando sua relação de complementaridade e algumas verificações experimentais. Um ponto importante neste capítulo é a discussão de Bohm sobre a realidade das propriedades ondulatórias da matéria (seção 11). O autor relaciona propriedades ondulatórias e corpusculares da matéria a partir de um experimento hipotético sobre a medição de um elétron com um microscópio de prótons. A partir da análise da transferência de momento entre próton, elétron e a lente do aparelho, de acordo com suas propriedades de onda e partícula, Bohm sugere que é possível obter a posição e o momento das partículas com uma incerteza menor que a permitida pela incerteza princípio. Assim, Bohm argumenta que “uma contradição do princípio da incerteza em qualquer ponto tornaria insustentável toda a dualidade onda-partícula” (1951, p. 135).

No entanto, Bohm ressalta que essa possível contradição pode ser evitada se forem feitas suposições adequadas, que estão de acordo com a teoria, mas ele também menciona que esse comportamento deve indicar algumas características desconhecidas das partículas. O autor

sugere que ao interagir com a lente, o próton deve ter algum tipo de ‘memória’ de sua interação com o elétron. No final do livro, capítulo 22, Bohm enfatiza que esse experimento hipotético seria um teste crucial da teoria.

Os dois últimos capítulos da parte I são destinados à estruturação geral dos conhecimentos apresentados ao longo da seção e à construção do que Bohm (1951) chama de “imagem física da realidade quântica”. O capítulo 7, denominado “Sumário dos conceitos quânticos introduzidos”, é composto por um único texto, sem subseções, de cerca de três páginas. Nele, Bohm elabora um enunciado que perpassa toda a trajetória percorrida pelos capítulos anteriores, uma síntese, ou resumo, da TQ voltado à noção de totalidade dos processos e à interconexão entre todas as partes da teoria.

Por fim, vimos que mesmo a função de onda sofre mudanças indivisíveis e incontroláveis quando o objeto em observação interage com um aparelho de medição. Esse comportamento da função de onda leva à descrição qualitativa das propriedades da matéria em termos de potencialidades incompletamente definidas e mutuamente incompatíveis, que podem ser realizadas mais plenamente apenas em interação com um sistema adequado no ambiente. Por exemplo, se um elétron mostra mais propriedades de onda ou de partícula, depende se ele interage com algo que tende a trazer à tona seus aspectos de onda ou de partícula. Somos, portanto, levados a considerar a matéria como algo mais fluido e dependente do meio ambiente do que a física clássica nos levaria a supor (BOHM, 1951, p. 143).

No capítulo 8, intitulado “Uma tentativa de construir uma imagem física da natureza quântica da matéria”, Bohm compara noções clássicas familiares à experiência cotidiana, como causalidade e continuidade, com as noções quânticas de processos descontínuos e indeterminados. O autor indica três principais mudanças entre as noções clássicas e quânticas:

- (1) Substituição da noção de trajetória contínua pela de transições indivisíveis.
- (2) Substituição da noção de determinismo completo pela de causalidade como tendência estatística.
- (3) Substituição da suposição de que o mundo pode ser corretamente analisado em partes distintas, cada uma tendo uma natureza "intrínseca" fixa (Por exemplo, onda ou partícula) pela ideia de que o mundo é um todo indivisível em que partes aparecem como abstrações ou aproximações, válidas apenas no limite clássico (BOHM, 1951, p. 144).

Bohm argumenta que não há nenhuma razão lógica *a priori* para adotarmos os conceitos de determinismo completo e continuidade sugeridos pela Física Clássica. Para ele (1951), a descrição de um objeto em movimento contínuo é sempre uma relação entre características do objeto, como seu momento linear, e características espaço-temporais, como as posições que tal objeto assume ao longo do movimento. Um objeto em movimento aparentemente contínuo



ocupa uma indefinida gama de posições discretas em um intervalo de tempo, o que contraria a noção de continuidade. Assim, movimento e posição são grandezas físicas que não podem existir simultaneamente, a definição precisa do movimento de uma partícula nos impede de uma definição igualmente precisa de sua posição. Nas palavras de Bohm (1951, p. 147), “É possível dar uma imagem contínua do movimento apenas se a posição for borrada ou indefinida, e é possível dar uma imagem de uma partícula em uma posição definida apenas se abrimos mão da possibilidade de retratá-la em movimento contínuo”, concluindo que a ideia de trajetórias contínuas, em uma descrição altamente precisa, não se aplica ao movimento de partículas reais.

Bohm, então, retoma as concepções clássicas de causa e efeito, argumentando que tais noções provavelmente se originaram na extrapolação das mais imediatas experiências dos homens para maiores classes de fenômenos. Ainda, argumenta que a FC leva a um ponto de vista mais prescritivo do que causal. Contudo, com o advento da TQ, as concepções de determinismo completo e causalidade se mostraram falhas, sendo substituídas pela noção de causalidade como determinando apenas uma tendência estatística, abdicando, por completo, da noção de um realismo determinista. O que está diretamente relacionado com as imposições trazidas pelo princípio da incerteza e a impossibilidade de existência simultânea de elementos distintos da realidade.

Na sequência, Bohm apresenta o princípio da complementaridade de Bohr, no qual afirma que um sistema desenvolve um momento ou posição definitivos dependendo da natureza do aparelho de medição com o qual ele interage. Assim, as propriedades corpusculares ou ondulatórias de um sistema dependem do meio com o qual ele interage, onde estas, em princípio, existem apenas como potencialidades do sistema. “Essas potencialidades se complementam, pois cada uma delas é necessária em uma descrição completa dos processos físicos pelos quais o elétron se manifesta; daí o nome ‘princípio de complementaridade’”. (BOHM, 1951, p. 159). Por fim, ele conclui que “o princípio da complementaridade representa uma mudança completa no tipo de conceito que é apropriado para a descrição da matéria no nível quântico, em comparação com os tipos de conceitos apropriados no nível clássico” (BOHM, 1951, p. 161).

A partir disso, Bohm argumenta em favor de uma concepção de mundo como uma unidade indivisível, uma vez que a natureza dita “intrínseca” da matéria, na verdade, são potencialidades que dependem das condições ao seu redor, o que indica uma interconexão entre todos os elementos constituintes da realidade física. Assim, ele aproxima essa concepção, obtida a partir da MQ, da natureza do pensamento, extrapolando uma analogia entre MQ e o

pensamento humano. Nas seções 27 e 28 do capítulo 8, Bohm argumenta sobre certos aspectos do processo de pensamento em relação ao princípio da incerteza e sobre possíveis razões para uma analogia entre os processos quânticos e de pensamento.

Assim, os processos de pensamento e os sistemas quânticos são análogos no sentido de que não podem ser muito analisados em termos de elementos distintos, porque a natureza “intrínseca” de cada elemento não é uma propriedade que existe separadamente e independentemente de outros elementos, mas é, em vez disso, uma propriedade que surge parcialmente de sua relação com outros elementos (BOHM, 1951, p. 169).

Bohm (1951, p. 170) retoma a posição de Bohr a respeito da relação entre TQ e o processo de pensamento, na qual “o pensamento envolve quantidades tão pequenas de energia que as limitações da teoria quântica desempenham um papel essencial na determinação de seu caráter”. O autor argumenta que os processos de pensamento envolvem uma grande quantidade de processos mecânicos no cérebro através das inúmeras conexões neurais, os quais são tão sensíveis e delicados que devem ser descritos em termos da TQ. Para Bohm (1951, p. 172), mesmo que tal hipótese esteja errada, uma analogia entre o pensamento e o processo quântico ainda é válida, sugerindo que “[...] o comportamento de nossos processos de pensamento pode talvez refletir de forma indireta alguns dos aspectos quânticos da matéria de que somos compostos”<sup>11</sup>.

Na parte seguinte, Bohm trata dos fundamentos matemáticos característicos da teoria, como a noção de operador, matriz, autovalor, autofunção, etc., demonstrando sua aplicabilidade na resolução de problemas quânticos. Os conceitos apresentados nessa seção formam a base matemática necessária para se compreender os desenvolvimentos posteriores da teoria, criando subsídios para a transição entre o surgimento da Teoria Quântica e o da Mecânica Quântica. Assim, na terceira parte da obra, Bohm aborda alguns dos problemas usualmente tratados em livros didáticos de MQ, isto é, algumas soluções para a equação de Schrödinger, sua extensão para as três dimensões, o oscilador harmônico, átomo de hidrogênio, momento angular, Spin e a formulação matricial da MQ. A partir disso, na parte IV, demonstra alguns métodos de solução aproximada para a equação de Schrödinger, sua dependência e independência do tempo, sistemas degenerativos e com perturbação.

---

<sup>11</sup> É importante destacar que a analogia elaborada por Bohm é extremamente especulativa e pouco fundamentada. Pode-se identificar uma tendência em alguns físicos da época em buscar explicar o problema da consciência humana a partir da mecânica quântica, no entanto, nenhum resultado concreto pode ser considerado devido a grande distância entre os temas e fragilidade dos argumentos apresentados em geral.

Nas partes II, III e IV, descritas acima, Bohm apresenta a MQ da forma como usualmente a encontramos em livros didáticos, i.e., partindo dos conceitos matemáticos de operador, autovalores e autofunções, resolvendo os problemas “clássicos” da MQ e introduzindo técnicas de solução aproximada, com a particularidade de que Bohm, diferentemente de uma parcela dos autores de livros didáticos, segue pela construção lógica desses conceitos, argumentando e justificando sua pertinência. Antes de adentrar na última parte da obra, destinada à tentativa de se construir uma teoria quântica da medição, Bohm apresenta em uma pequena parte a teoria do espalhamento, onde discute suas características teóricas e experimentais.

Na última parte Bohm busca estruturar e discutir a necessidade de elaboração de uma teoria quântica dos processos de medição, discutindo aí as implicações que surgem à MQ a partir do processo de medição e indicando supostas alternativas para a solução do problema que a envolve. Dessa forma, é nesta última seção que Bohm discute sobre a natureza do aparelho de medição e a relação entre observador e observado, subsidiado por suas noções bohrianas. Bohm começa pelas implicações trazidas pelo argumento EPR, afirmando que este pressupõe a possibilidade de se analisar corretamente o mundo em distintos e bem definidos elementos de realidade, o que avalia não ser possível. A suposição do argumento acerca da existência de elementos distintos de realidade, para ele, seria a base de uma descrição causal da MQ, no entanto, Bohm afirma, novamente, que essa suposição é incompatível com a teoria, pois viola o princípio da incerteza. A grande questão teórica por trás do problema da medição exposta por Bohm, fora as concepções de realidade discutidas, é o princípio da incerteza, que considera como a implicação central para se obter uma descrição causal e precisa de um sistema quanta-mecânico.

Contudo, Bohm indica um experimento hipotético no qual se obtém uma incerteza menor que a permitida pelo princípio da incerteza na determinação do momento de um elétron que pode ser um teste crucial para a teoria. O autor refere não ser viável a execução de tal experimento a partir das técnicas presentes na época e finaliza a discussão afirmando que, enquanto tal experimento não for possível, a TQ continuará sendo a teoria mais autoconsistente existente, e as variáveis ocultas continuam sendo inconsistentes.

O enunciado da TQ de Bohm no livro didático *Quantum Theory* (1951), formulado a partir de sua experiência como educador e direcionado para estudantes de graduação, consiste de uma distinta abordagem para o tema, em relação às usualmente encontradas, dando ênfase à dimensão interpretativa da teoria enunciada a partir de um caráter argumentativo, visando à

construção, e não postulação, dos conceitos físicos. Os tradicionais axiomas matemáticos, fundamentais para o entendimento da teoria, são inseridos em meio aos argumentos de Bohm sobre os conhecimentos em questão. Ele argumenta com as equações expostas, fundamentando suas origens, significados e implicações, sob um ponto de vista essencialmente bohriano. Isto é, buscando traçar suas relações com os fenômenos clássicos, nos limites da TQ, e indicando, em diferentes momentos ao longo da obra, a totalidade inalisável dos processos quânticos, a relação entre o fenômeno observado e o aparato (e cientista) observador.

## **4.2 Características discursivas e epistêmicas do enunciado didático**

A partir da análise geral do enunciado de Bohm no livro *Quantum Theory* (1951), apresentada na seção anterior, elencamos cinco características que podemos ressaltar a partir da interpretação do enunciado em diálogo com o contexto extraverbal. Essas características estão divididas nas próximas cinco subseções, nas quais buscamos discutir com mais profundidade acerca de cada uma delas. A saber, as características identificadas são as seguintes: construção e justificação dos conceitos (o estilo adotado); alternância entre o concreto e o abstrato (caracterizando a estrutura composicional); adesão total à interpretação da complementaridade (indicando as vozes subjacentes); e discussão acerca dos fundamentos e limites da física (o tema do enunciado).

### **4.2.1 Estilo: construção e justificação dos conceitos**

O estilo adotado por Bohm ao elaborar seu enunciado segue, em linhas gerais, o estilo dos enunciados elaborados em meio ao gênero didático. No entanto, há elementos estilísticos no enunciado didático de Bohm que não são diretamente imposições do gênero didático, mas que consistem de um elemento diferencial e enriquecedor dessa dimensão de seu enunciado. Enunciados elaborados em meio ao gênero didático têm por objetivo a apropriação de saberes e conhecimentos pelo interlocutor, isto é, enunciados didáticos são formulados visando ao favorecimento dos processos de ensino e aprendizagem.

Olhando para os livros didáticos usualmente encontrados relacionados à TQ, não encontramos uma grande preocupação com tais questões impostas pelo gênero didático. Nesses livros, encontramos uma extensa preocupação com a resolução de problemas e o desenvolvimento das habilidades matemáticas, fundamentais à formação do cientista. No entanto, o grande foco nessas questões acaba por abafar o caráter argumentativo e descritivo da

ciência, fazendo dela uma mera ferramenta na solução de problemas. Isto é, livros didáticos elaborados dessa forma tomam um caráter tecnicista, onde os produtos do desenvolvimento científico se transformam em técnicas de resolução de problemas. A fim de exemplificar, Griffiths (2011) apresenta a equação de Schrödinger em menos de uma página, com cerca de três parágrafos, postulando sua existência, e, a partir disso, segue para suas aplicações e resoluções.

Kaiser (2014) argumenta que, especialmente no período pós-segunda guerra mundial, o ensino de Física se aproximou de uma concepção de *shut up and calculate* (cale-se e calcule), expressão cunhada pelo autor para retratar o abafamento das discussões relacionadas aos fundamentos da Física e a ênfase extensiva dada à solução de problemas. Johansson et al. (2016) trazem que essa noção é um discurso usualmente encontrado em cursos quando se trata da FQ, sendo essa uma posição excludente para a formação de novos físicos que leva à criação de uma cultura elitista para a Física, embasada em seu caráter instrumentalista.

Contudo, tanto o excesso quanto a falta de cálculos e articulações matemáticas são prejudiciais à formação do cientista. A dimensão matemática abstrata da Física é um elemento central da área. No entanto, sua posição não deve ser extrapolada nem negligenciada. Lima et al. (2019) mostram que a abordagem dada aos trabalhos de De Broglie e à dualidade onda-partícula em livros didáticos usualmente encontrados em cursos de nível superior é feita de forma a abafar todo o complexo arranjo matemático elaborado pelo autor para formular sua noção de natureza dual da matéria, tratando-a como um postulado. Para os autores, isso reforça a noção de mito do gênio, isto é, que grandes ideias simplesmente aparecem para os cientistas, que a partir disso postulam sua existência, enquanto, na realidade, essas ideias são extensamente formuladas e estruturadas até finalmente chegarem a uma forma consistente.

Por um lado, os livros didáticos debruçam-se sobre uma extensa matematização e instrumentalização da Física, quando relacionada à solução de problemas, por outro, postulam a existência de conceitos fundamentais sem mencionar suas origens e articulações internas, tudo dentro de um mesmo estilo. A partir desse panorama geral, identificamos em Bohm um estilo distinto para a elaboração de seu enunciado didático. Ele não adota a perspectiva do “cale-se e calcule”, mesmo elaborando seu enunciado no período pós-guerra, nem postula a existência de conceitos chave sem mencionar suas articulações internas e derivações originais. Ao invés de adotar o estilo de postular e calcular, Bohm busca construir e justificar os conceitos da teoria, demonstrando as articulações feitas frente à FC e as hipóteses quânticas que originam esses conceitos. As questões relacionadas à resolução de problemas e à execução de cálculos

matemáticos ainda se fazem presentes, no entanto, não na condição de fio condutor do enunciado. Isto é, Bohm traz a resolução de problemas em pontos onde ela é essencialmente necessária, tratando as demais partes sob uma perspectiva argumentativa frente às abstratas equações encontradas. Em outras palavras, ele dialoga com os conceitos e as equações da teoria, argumentando entre eles e a realidade física observada, sem se voltar a uma completa postulação e resolução de exercícios.

Ao formular seu enunciado didático, Bohm adota um estilo voltado à construção e justificação dos conceitos operados pela teoria, demonstrando suas origens, articulações internas e pertinência frente ao tema em questão. Podemos observar, por exemplo, que Bohm constrói a equação de Schrödinger a partir da propagação de ondas eletromagnéticas e a hipótese de De Broglie, tudo em um único capítulo. Na introdução deste capítulo, descreve o percurso a ser seguido, possibilitando observar, de forma geral, a construção e justificação feita para a descrição ondulatória da matéria.

Neste capítulo, desenvolvemos a teoria das ondas de matéria de De Broglie, obtendo as chamadas "relações de De Broglie", que definem o comprimento de onda em termos de momento e a frequência em termos de energia. Vamos demonstrar que, no limite clássico, tais ondas se movem de uma maneira que as torna semelhantes às partículas clássicas, mas são, no entanto, capazes de explicar corretamente a existência de estados de energia permitidos e definidos no nível quântico dos átomos. Discutiremos então a evidência experimental direta fornecida por Davisson e Germer para a existência de ondas de elétrons. Veremos, entretanto, que essas ondas devem ser interpretadas em termos da probabilidade de que uma partícula possa ser encontrada em um determinado ponto. Finalmente, devemos derivar uma equação diferencial parcial (equação de Schrödinger) que governa a propagação das ondas de De Broglie (BOHM, 1951, p. 59-60).

As articulações da equação de Schrödinger e sua resolução são deixadas para a terceira e quarta parte do livro, o que permite observar também que Bohm divide a construção do conceito de sua operacionalização e aplicação. Ao final do capítulo, ele já indica essa separação e reforça o papel de destaque da equação de Schrödinger como sendo a principal equação da MQ. Contudo, antes de chegar na derivação da equação, Bohm começa a construí-la a partir da constituição de um feixe de ondas eletromagnéticas e, junto disso, de um pacote de ondas. Assim, ele introduz a ideia de pacotes de onda para a descrição do elétron e deriva, mesmo que de forma distinta da original, a relação de De Broglie  $p = \frac{h}{\lambda}$ , para a correlação entre propriedades corpusculares e ondulatórias da matéria (Bohm ainda comenta, após realizar essa derivação, que o método seguido por ele não é o mesmo adotado por De Broglie, que o fez a partir da Física relativística, indicando em linhas gerais os passos originalmente traçados). O

autor então apresenta diferentes evidências que corroboram uma descrição ondulatória da matéria, como a difração de elétrons, e, a partir disso, deriva a equação de Schrödinger.

Diante disso, observamos que Bohm não postula a existência da dualidade onda-partícula, mas a constrói a partir da noção de pacotes de onda e a justifica frente a resultados experimentais que fortalecem sua pertinência. Processo semelhante se dá para a equação de Schrödinger, construída e justificada a partir desses mesmos elementos. Ainda, Bohm volta à equação em capítulos posteriores e justifica sua aplicação para os mais variados sistemas frente a outros resultados experimentais, demonstrando a necessidade de adaptá-la às diferentes condições impostas pelos sistemas.

#### 4.2.2 Estrutura composicional: alternância entre o concreto e o abstrato

A estrutura composicional é um dos elementos centrais que caracterizam um enunciado escrito. Como mencionam Lima et al. (2019), no caso de enunciados feitos por meio de livros a estrutura composicional também se expressa pela fragmentação desses enunciados em capítulos, seções e tópicos. Para tanto, no Quadro 2, a seguir, apresentamos a estrutura geral do enunciado de Bohm, sendo essa a sua divisão em partes e capítulos.

Quadro 2 – Divisão do livro *Quantum Theory* (1951) em partes e capítulos

<b>Partes</b>	<b>Capítulos</b>
I) Formulação física da teoria quântica	1. A origem da teoria quântica 2. Desenvolvimentos posteriores da recente teoria quântica 3. Pacotes de ondas e ondas de De Broglie 4. A definição de probabilidades 5. O princípio da incerteza 6. Propriedades da matéria onda vs partícula 7. Sumário dos conceitos quânticos introduzidos 8. Uma tentativa de se construir uma imagem física da natureza quântica da matéria
II) Formulação matemática da teoria quântica	9. Funções de onda, operadores e equação de Schrödinger. 10. Flutuações, correlações e autofunções.
III) Aplicações para sistemas simples. Extensões posteriores da formulação teoria quântica	11. Soluções da equação de onda para potenciais quadrados. 12. O limite clássico da teoria quântica. A aproximação WKB. 13. O oscilador harmônico. 14. Momento angular e equação de onda tridimensional. 15. Solução da equação radial, átomo de hidrogênio, o efeito de um campo magnético. 16. Formulação matricial da teoria quântica. 17. Spin e momento angular.
IV) Métodos de soluções aproximadas para a equação de Schrödinger	18. Teoria da perturbação, dependente e independente do tempo. 19. Perturbações degenerativas.

	20. Aproximações repentina e adiabática
V) Teoria do espalhamento	21. Teoria do espalhamento
VI) Teoria quântica do processo de medição	22. Teoria quântica do processo de medição 23. Relação entre conceitos quânticos e clássicos

Fonte: autor, 2021.

Ao observar a estrutura geral do enunciado, e tendo em mente sua descrição feita na seção anterior, podemos interpretá-la como privilegiando uma alternância entre o concreto e o abstrato. Isto é, Bohm começa seu enunciado partindo dos desenvolvimentos teóricos e experimentais que constituem a TQ e a constrói com base na realidade concreta, em experimentos realizados e suas articulações com as questões conceituais da Física. Na segunda parte, ele elabora a estrutura matemática abstrata da teoria, relacionando-a com a concreta estruturada anteriormente. A partir dessa estrutura matemática abstrata, que articula com a estrutura concreta inicialmente construída, nas partes III, IV e V, o autor volta ao concreto e aborda tópicos característicos da MQ, como o oscilador harmônico, as soluções para o átomo de hidrogênio, os estados degenerativos e o espalhamento de partículas, relacionando-os com as questões experimentais que os subsidiam. Na última parte da obra, Bohm retorna novamente ao abstrato, discutindo as questões vinculadas ao problema da medição, isto é, a natureza do aparelho de medição, os processos de medição clássicos e quânticos, a relação entre observador e observado nesses processos, chegando à argumentação acerca da impossibilidade de inserção de variáveis ocultas na MQ. Por fim, conclui seu enunciado com uma discussão acerca da relação entre conceitos clássicos e quânticos.

Frente a isso, a interpretação a partir da noção de alternância se faz mais clara. Bohm começa por enunciar a TQ por meio de sua dimensão concreta para depois passar para sua dimensão abstrata, trazendo elementos da dimensão concreta. A partir dessa dimensão abstrata construída, retorna ao concreto e o trata no contexto dos problemas característicos da MQ, fundamentando-se nas duas construções já elaboradas. Por fim, retorna ao abstrato, subsidiado por toda a construção feita anteriormente, e direciona seu enunciado para os problemas relacionados aos fundamentos e limites da física, discorrendo sobre suas implicações e possíveis soluções.

Podemos, ainda, identificar um paralelo entre essa alternância na estrutura de Bohm e a noção de ascensão do abstrato ao concreto de Vygotsky, segundo a qual “O concreto pensado, resultado da reflexão e da elaboração a partir dos conceitos científicos, conduz ao novo concreto, síntese de múltiplas determinações, em um movimento de idas e voltas em espiral”



(CREPALDE; AGUIAR JR., 2013, p. 314-315). Os autores ressaltam, igualmente, a relação entre tal noção vygotskiana e o pensamento de Bakhtin e Marx, os quais também se fazem presentes neste trabalho. Quanto à dinâmica entre o concreto e o abstrato sob a perspectiva marxista, Crepalde e Aguiar Jr. (2013, p. 301) afirmam: “No primeiro movimento o concreto volatiliza-se em uma determinação abstrata; no segundo, a abstração leva a reprodução do concreto por meio do pensamento”.

Em um primeiro momento, a TQ é formulada a partir de sua dimensão concreta e, em meio a isso, desenvolve-se sua dimensão abstrata. Isto é, parte do concreto para ascender ao abstrato. No segundo momento a dinâmica é invertida, parte-se do formalismo abstrato da teoria para então reproduzir o concreto com base nele. Como característica própria da dialética, mesmo nos momentos cujo núcleo central é a dimensão concreta, observamos o movimento de Bohm em direção a uma síntese dialética entre essas duas dimensões da teoria. É no movimento de idas e vindas entre o concreto e o abstrato que cada uma dessas dimensões se enriquece de significado.

A partir disso, podemos interpretar a estrutura composicional do enunciado de Bohm como um movimento dialético entre o concreto e o abstrato, similar à noção marxista expressa por Vygotsky e Bakhtin. Uma possível razão para tal similaridade talvez seja a influência do pensamento marxista no autor na época, como mencionado na reconstrução dos seus aspectos biográficos, que, mesmo sem termos noção de suas intenções diretas, acaba por trazer elementos da dialética materialista em seu enunciado.

#### 4.2.3 Vozes subjacentes: Complementaridade e Realismo

A formação de um enunciado dentro de determinado gênero sempre leva em si uma resposta a enunciados passados já elaborados dentro dessa temática, ou de temáticas relacionadas. Nisso, ao enunciar a teoria quântica dentro do gênero didático, Bohm responde aos enunciados originais constituintes da teoria. No entanto, a seleção dos enunciados a serem respondidos é uma escolha pessoal do locutor, embasada em sua experiência viva, suas preferências e proximidades dentro do campo. Em um enunciado para a teoria quântica, em especial no gênero didático, há enunciados passados que não podem deixar de ser respondidos, como os que contêm os conceitos fundamentais da teoria, contudo, enunciados relacionados à dimensão interpretativa da teoria são vagamente mencionados. Nos casos em que se faz breves menções às interpretações da teoria, como a atribuição de significado ou realidade para os conceitos, ainda encontramos uma mistura de interpretações que acabam por confundir o leitor

e o afastam da compreensão da atividade científica enquanto uma constante disputa entre diferentes proposições.

Lima et al. (2019), ao investigarem a história do fóton presente em livros didáticos de ensino médio, constatam que esses materiais apresentam uma visão reduzida da história, elaborando um enunciado que mistura diferentes elementos interpretativos sem diferenciá-los. Isto é, a controversia história do fóton, com quase um século de discussões, é resumida em um único enunciado constituído de uma interpretação mista. As vozes subjacentes desses enunciados são tantas e tão distintas, trazidas como sendo uma única perspectiva, que pouco se pode compreender a respeito das polêmicas discussões que acompanham o desenvolvimento do conceito de fóton ao longo do século, e tampouco se pode identificar as peculiaridades de cada concepção empregada na busca pela compreensão do conceito e seu elemento de realidade.

Bohm formula seu enunciado fortemente influenciado pela Interpretação da Complementaridade, adotando suas proposições quanto a natureza da matéria, no entanto, propõe algumas discussões as quais a interpretação da complementaridade evita. Como mencionado anteriormente, Freire Jr. (2019), ao comentar sobre a elaboração do livro didático, afirma que pouco se sabe sobre como se deu esse processo, apenas que Bohm manifestou suas inclinações bohrianas quanto à interpretação da MQ. A interpretação da complementaridade é explicitamente indicada pelo autor no prefácio da obra como sendo a base necessária para a compreensão racional da teoria, ao referir que “Uma série de palestras de Niels Bohr, intitulada ‘Teoria atômica e a descrição da natureza’, foram de importância crucial no fornecimento da base filosófica geral necessária para uma compreensão racional da teoria quântica” (BOHM, 1951, p. 9).

Bohm adota explicitamente o Princípio da Correspondência de Bohr e sua noção de totalidade inalisável entre observador e observado. O princípio é tido por Bohm como a principal abordagem para os conceitos quânticos, no qual estes devem levar aos conceitos clássicos como uma aproximação. A noção de totalidade entre observador e observado é tratada mais diretamente na seção destinada a teoria quântica do processo de medição, na qual Bohm reforça sua noção de totalidade da natureza (o que posteriormente, nos anos 80, é retomado e reformulado pelo autor por meio de seus trabalhos relacionados a totalidade e a ordem implicada).

A dualidade onda-partícula, um dos principais tópicos iniciais da TQ, também é enunciada por Bohm como uma resposta à complementaridade, na qual o autor concebe as propriedades corpusculares e ondulatórias da matéria como um par de potencialidades opostas.

“Esse novo conceito considera essas propriedades como potencialidades incompletamente definidas, cujo desenvolvimento depende dos sistemas com os quais o objeto interage, bem como do próprio objeto” (BOHM, 1951, p. 132).

Ao enunciar propriamente o princípio da complementaridade, na seção 15, capítulo 8, da parte 1, Bohm afirma que a ideia de que as propriedades básicas da matéria não existem em uma forma precisamente definida é uma enorme mudança nos tipos de conceitos utilizados na expressão das teorias físicas, o que, segundo ele, foi expresso por Bohr em seu princípio da complementaridade. Ainda, ele dá uma definição formal ao princípio, registrando que: “No nível quântico, as propriedades físicas mais gerais de qualquer sistema devem ser expressas em termos de pares complementares de variáveis, cada uma das quais pode ser melhor definida apenas à custa de uma perda correspondente no grau de definição da outra” (BOHM, 1951, p. 160). E conclui que o princípio da complementaridade representa “uma mudança radical no tipo de conceito que é apropriado para a descrição da matéria no nível quântico, em comparação com os tipos de conceitos apropriados no nível clássico” (BOHM, 1951, p. 161). Além disso, ao buscar construir uma TQ para os processos de medição, Bohm discute acerca do problema da medição, do argumento EPR e das relações entre conceitos clássicos e quânticos sob o ponto de vista da complementaridade.

Contudo, mesmo com a forte influência da complementaridade de Bohr, Bohm traz em seu enunciado elementos de uma visão realista, como por exemplo seus esforços em construir uma imagem física da realidade quântica (cap. 8). Influenciado por uma visão realista, Bohm busca construir uma ‘imagem da realidade’ a partir da natureza da matéria como descrita pela TQ. Tal visão realista pode ser relacionada com o envolvimento de Bohm com o partido comunista e, com isso, a concepção materialista-marxista. A Complementaridade, por sua vez, renuncia a adoção de modelos, como arranjos conceituais bem definidos articulados na formação de tal imagem.

O realismo implicado pelo materialismo se opõe à renúncia ao determinismo completo da Complementaridade. Disto pode-se identificar uma certa contradição, talvez não identificada pelo autor, nas concepções adotadas. Isto é, a devoção de Bohm à complementaridade e seus anseios por formular uma imagem da realidade. Ao olhar para os artigos posteriores nos quais Bohm apresenta sua interpretação alternativa para a MQ, observa-se que Bohm abandona suas inclinações bohrianas e adota o realismo científico. Neles, o autor apresenta uma crítica a complementaridade e sua renúncia em prover modelos. Contudo, em seu enunciado no livro didático, Bohm (1951) não faz nenhuma menção a esta possível contradição.

Do presente pode-se observar que Bohm formula seu enunciado para a TQ como uma resposta à complementaridade, influenciada, talvez não intencionalmente, por sua visão realista. Em suma, Bohm assume a interpretação da complementaridade como a principal linha interpretativa para o entendimento da TQ, o fio condutor de seu enunciado no entanto, se propõe a discutir elementos que vão além dos quais a interpretação de Bohr se propõe: a construção de uma imagem da realidade. Bohm busca tratar a TQ como não apenas um instrumento para previsões experimentais, mas, também, como algo capaz de proporcionar uma imagem da realidade. Ainda, a partir de sua posterior proposição acerca de uma interpretação causal para a MQ (Bohm, 1952a; 1952b), junto de sua crítica a renúncia da complementaridade em fornecer modelos, pode-se traçar um possível amadurecimento de sua concepção realista.

#### 4.2.4 Tema: fundamentos e limites da Física

O tema de um enunciado refere-se, evidentemente, ao assunto em questão que nele é abordado. Em um enunciado para a TQ, como é o analisado neste trabalho, o tema principal consiste na própria teoria, contudo, isso não limita os demais possíveis temas relacionados que podem estar presentes no enunciado. Assim como nas demais categorias discutidas previamente, a seleção desses temas é uma escolha pessoal do autor embasada em suas preferências individuais e familiaridades dentro, ou próximo, da área. Desta forma, identificar a temática do enunciado de Bohm como relacionada aos fundamentos e limites da Física. Ainda, pode-se observar que a presença destes elementos temáticos faz com que o livro didático de Bohm diferencie-se dos descritos por Kuhn (2017), nos quais o LD serve apenas como manual instrumental para a reprodução da ciência normal.

Ao olharmos para os usuais livros didáticos relacionados à MQ, encontramos poucas menções aos temas identificados no enunciado de Bohm, o que justifica os argumentos de Kuhn em uma descrição geral. Para fins de comparação, Griffiths (2011) aborda as questões vinculadas aos fundamentos da Física, no caso, o paradoxo EPR e as desigualdades de Bell, apenas no epílogo da obra, destinando menos de uma página para o EPR (p. 313) e quatro páginas para o teorema de Bell (p. 314-318). Ainda, essas discussões são feitas de forma extremamente reduzida e simplificada, somente informando um panorama geral dos problemas apresentados sem aprofundá-los em suas implicações.

O motivo dessa ausência de discussões relacionadas aos fundamentos e limites da física em livros didáticos pode ser identificado na concepção tecnicista que guia uma considerável parcela desses materiais. Como mencionado na seção relacionada ao estilo do enunciado, Kaiser

(2014) e Johansson et al. (2016) indicam o viés tecnicista por trás do ensino de Física, em especial de mecânica quântica, e do surgimento do fenômeno do “cale-se e calcule” (*shut up and calculate*). Dessa forma, os livros elaborados sob essa perspectiva são voltados para a resolução de problemas e aplicação de conceitos. Nisso, as discussões relacionadas aos fundamentos das teorias enunciadas acabam, por vezes, sendo negligenciadas ou até excluídas.

Ainda, como o objetivo de um livro didático é a apropriação dos saberes contidos em uma teoria científica, opta-se, ao estruturá-lo, pela ênfase nos conceitos básicos dessa teoria e em sua operacionalização. Questões relacionadas aos fundamentos da Física e seus limites são deixadas de lado por serem consideradas tópicos complexos ou puramente filosóficos, que não cabem nas discussões a que o livro didático se propõe. O problema de relacionar os tópicos fundamentais das teorias com os conceitos básicos que elas envolvem é ignorado e, com isso, tem-se a presença apenas dos conceitos básicos, uma vez que a conexão entre eles e os fundamentos da Física exige uma grande articulação conceitual.

Fundamentos da Física é um eixo temático das pesquisas em Física usualmente atribuído a discussões acerca dos princípios e concepções que fundamentam as teorias físicas, isto é, a natureza da estrutura espaço-temporal, a irreversibilidade dos processos, probabilidade, natureza da matéria e dos processos de medição, etc. No enunciado de Bohm, identificamos a presença de discussões relacionadas aos fundamentos da Física, como a relação entre conceitos clássicos e quânticos, o problema da medição e a natureza da matéria. Junto disso, também é discutido os limites da Física, como o limite clássico da TQ, possíveis anomalias e a analogia entre pensamento e MQ.

No capítulo 8, Bohm destaca as mudanças necessárias nas noções fundamentais clássicas para a descrição da natureza quântica da matéria. Como mencionamos na descrição geral do enunciado (sec. 4.1), Bohm sugere que a noção clássica de que o mundo pode ser corretamente analisado em elementos distintos de realidade deve ser substituída pela “pela ideia de que o mundo é um todo indivisível em que partes aparecem como abstrações ou aproximações, válidas apenas no limite clássico” (p. 144). Posteriormente, nos anos 1980, Bohm retoma essa noção, reformulando-a, a partir de seus trabalhos relacionados à totalidade e a ordem implicada na natureza (BOHM, 2008). Disto pode-se especular acerca de uma possível antecipação, de quase trinta anos, de suas futuras ideias quanto aos fundamentos da Física em seu livro didático.

Na sequência, ainda no mesmo capítulo, Bohm discorre sobre antigas ideias relacionadas ao movimento e a continuidade, sugerindo que a noção de trajetórias contínuas

não concorda com a realidade pois um objeto em movimento nunca está em uma determinada posição, isto porque os conceitos de movimento e posição são opostos. “Nesse mesmo conceito de movimento, parece que devemos incluir a ideia de que um objeto em movimento contínuo tem uma gama de posições um tanto indefinida” (1951, p. 146). O autor ressalta que as noções clássicas de continuidade e causalidade surgem, principalmente, de extrapolações de nossas experiências cotidianas comuns, mas a natureza da matéria deve ser considerada descontínua e com causas estatísticas. “O sistema de conceitos quânticos envolve as suposições de continuidade incompleta, determinismo incompleto e a unidade indivisível de todo o universo” (BOHM, 1951, p. 168).

O problema da medição, outro tópico relacionado aos fundamentos da física enunciado por Bohm, é discutido primeiramente ao longo do capítulo 5, no qual ele enuncia o princípio da incerteza e as implicações advindas dele. O autor começa por argumentar acerca dos processos de medição na FC e, a partir disso, busca estabelecer relações com o mesmo processo em sistemas quânticos, indicando as modificações necessárias para abranger esses novos sistemas. Assim, nesse primeiro momento, Bohm discute o problema da medição a partir do princípio da incerteza, estruturando o problema com base no experimento mental do microscópio de raios gama de Heisenberg e, com isso, na impossibilidade de se obter valores simultâneos e altamente precisos para duas grandezas físicas como momento e posição, ou energia e tempo.

A discussão acerca dos processos de medição é sempre pertinente à abordagem do princípio da incerteza, visto que o problema da medição emerge, em certa medida, do princípio. Contudo, além de discutir o processo de medição junto ao princípio da incerteza, Bohm dedica a última parte do livro a uma tentativa de elaborar uma TQ da medição. Nela, ele aborda o problema a partir da discussão acerca da natureza do aparato de medição e, assim, volta a argumentar sobre a relação entre mente e corpo, mas, dessa vez, referindo a relação entre observador e observado.

Bohm parte da constatação de que um processo de medição é sempre uma interação entre o ente observado, o aparato de medição e a mente humana que recebe e interpreta os sinais, ou informações, que advêm do processo. Dessa forma, o processo de medição não se restringe a descrever um objeto observado, mas envolve compreender a inter-relação entre os elementos que compõem o ato da medida. A partir do momento em que um sistema físico interage com um aparato de medição, seu estado original, pré-medição, é completamente alterado, visando à obtenção de um determinado valor para uma grandeza física previamente

selecionada. Ainda, o valor e a grandeza obtidos em tal processo estão diretamente ligados com as condições experimentais aos quais são submetidos, reforçando a noção de que um experimento sempre responde às condições que lhe são impostas.

Segundo a teoria da medição discutida por Bohm (1951, p. 587), as questões relacionadas à recepção da informação pelo cérebro são irrelevantes, uma vez que “é necessário apenas levar a análise a algum estágio classicamente descritível do aparelho”. No entanto, o autor julga pertinente uma especulação no que considera um “fascinante problema geral” (1951, p. 587), discutindo-o a partir das especulações apresentadas anteriormente sobre possíveis características quanta-mecânicas do cérebro. Com isso, ele volta a argumentar sobre a natureza da mente, indicando que esta deve ser entendida como uma unidade na qual uma clara distinção entre o observador e o resto do mundo não pode ser postulada. Assim, Bohm retoma a complementaridade bohriana e a noção de totalidade inalisável entre observador e observado

Após especular sobre os limites entre a consciência humana e o mundo externo, o autor retoma a discussão sobre a teoria da medição em termos clássicos, deixando a especulação anterior de lado e voltando-se aos elementos físicos do processo. Ao abordar temas como a destruição dos padrões de interferência nos processos de medição, a medição do spin de uma partícula, os estados emaranhados da função de onda e a irreversibilidade dos processos físicos, Bohm chega às implicações propostas pelo argumento EPR e ao problema da validade da interpretação geral aceita sobre a MQ. No entanto, mesmo concordando com certos aspectos do argumento, ele afirma que, em MQ, não é possível assumir relações de um-para-um entre expressões matemáticas e o mundo real, como é feito na FC. Logo, a suposta falta de completude da MQ seria, na verdade, o surgimento da necessidade de elaboração de novos conceitos que superem a ideia de uma correlação direta e única entre descrições matemáticas e o mundo real.

Por fim, como já foi mencionado ao longo das seções, Bohm conclui seu enunciado de maneira a demonstrar a inconsistência entre a noção de variáveis ocultas e a MQ, descartando a possibilidade. No entanto, faz referência a um experimento hipotético elaborado no capítulo 6 no qual, em princípio, poderia ser possível obter uma incerteza menor que a permitida pelo princípio da incerteza. No entanto, como ressalta o autor, existem algumas maneiras de evitar essa possível contradição com as premissas de Bohr, além de o experimento proposto não poder ser realizado devido aos métodos experimentais disponíveis. Dessa forma, Bohm apresenta uma possível anomalia na TQ, os pressupostos necessários para evitá-la e suas implicações.

A partir do discutido nesta seção, podemos concluir que Bohm, ao incluir elementos atrelados aos fundamentos e limites da Física em seu enunciado didático, o diferencia dos demais enunciados didáticos que encontramos. Isso pode ser observado nas discussões concernentes à relação mente-corpo, ao limite da aplicabilidade da TQ na suposição feita sobre a natureza do pensamento, assim como na ênfase em demonstrar o limite clássico da teoria ao introduzir os conceitos desenvolvidos pela TQ e nas discussões sobre as imposições presentes na teoria para o processo de medição. Junto das implicações trazidas por Bohm sobre esses limites da TQ, observamos uma constante preocupação em fornecer alternativas, mesmo que hipotéticas, para a superação desses limites, outro elemento que rompe com o tema usual dos livros relacionados à TQ. Ao fazer isso, ele traz mais um importante elemento da atividade científica para seu enunciado didático, a reflexão crítica frente ao que se considera os limites de uma teoria e às articulações conceituais, de caráter argumentativo e hipotético, que podem ser feitas para buscar sua superação. Dessa forma, ao lado das demais categorias analisadas na presente seção, podemos observar que Bohm aproxima a pesquisa científica, com suas controvérsias e problemas sem solução, da formulação didática dos livros utilizados na formação dos futuros cientistas. Com isso, ele encontra uma rota para a atividade pedagógica educacional que a aproxima da pesquisa científica desenvolvida pelos tópicos de fronteira da Física.



## 5. O LIVRO DIDÁTICO E A RECIPROCIDADE ENTRE ENSINAR E PESQUISAR

Frente à análise metalinguística desenvolvida e às características discursivas e epistêmicas identificadas no enunciado de Bohm para a Teoria Quântica, aqui apresentamos uma reflexão/discussão acerca dos elementos que podem indicar uma reciprocidade entre os atos de pesquisar e ensinar ciências. Centramos a discussão do capítulo na elaboração de um livro didático e sua relação com a pesquisa científica, tendo em vista os elementos identificados anteriormente, buscando apontar uma possível caracterização do ato de escrita de um livro didático enquanto uma atividade de pesquisa. Por fim, pretendemos traçar uma reflexão acerca da mútua reciprocidade entre pesquisar e ensinar ciências. Para tanto, estruturamos a discussão a partir de três teses centrais que serão apresentadas ao longo do texto – ainda, as duas primeiras estão ligadas à relação entre a escrita do livro didático e a pesquisa científica, enquanto na última refletimos sobre a reciprocidade entre o ensinar e o pesquisar.

### Organização do Conhecimento

Nossa primeira tese, ou consideração, consiste em sugerir que *a organização mental do conhecimento implicada pela escrita do livro didático, ou até mesmo pelo ato de ensinar em geral, pode favorecer a pesquisa desenvolvida por um cientista*. De início, observa-se que o ato de ensinar um dado conhecimento implica em uma organização mental por parte do educador quanto às estruturas internas do saber em questão. Ou seja, é necessário ao sujeito que ensina ter clareza quanto aos saberes específicos envolvidos na composição e articulação do conhecimento geral a ser ensinado. A preparação para ensinar, assim, envolve a retomada dos saberes adquiridos pelo educador ao longo de sua formação e atuação profissional, junto da elaboração de uma estrutura para esses saberes – a qual se dá frente a objetivos pedagógicos.

O processo de retomada do conhecimento é investigado por uma parcela de pesquisas relacionadas à psicologia cognitiva, as quais indicam que esse processo pode favorecer o surgimento de novas perguntas e ideias. Phillips, Watkins e Hammer (2017; 2018) argumentam que o processo de revisar conteúdos possibilita o desenvolvimento de novas perguntas e a identificação de incompreensões e incertezas no conhecimento. Por meio deste processo, do movimento de pensar sobre o conhecimento e rever compreensões, pode-se identificar falhas e lacunas no conhecimento, conduzindo ao surgimento de novas perguntas. Mesmo que o trabalho dos autores seja direcionado ao processo de ensino-aprendizagem em contextos

educacionais, eles mencionam que a história da ciência é repleta de revisões do conhecimento nas quais o cientista, ao revisar saberes aparentemente consolidados, percebe lacunas capazes de gerar novas perguntas e conhecimentos. Em termos kuhnianos, poderíamos dizer que revisar conhecimentos já consolidados pela ciência normal favorece a identificação de anomalias no paradigma e a reflexão crítica quanto a este.

No que se refere à escrita do livro didático, pode-se supor uma intensificação dessa retomada e reestruturação do conhecimento na medida em que esse material busca apresentar, de uma só vez, uma considerável parcela de saberes associados a uma área do conhecimento. Podemos identificar dois principais processos envolvidos na escrita de um livro didático que são de especial interesse. O primeiro é a retomada dos saberes internos ao conhecimento a ser apresentado e suas articulações. O segundo, a partir de um panorama geral obtido frente ao processo anterior, é a estruturação desses saberes de forma a construir a teoria em questão, tendo em vista objetivos pedagógicos/educacionais bem definidos. Assim, pode-se identificar na escrita do livro didático o exercício de um processo cognitivo por parte do autor, o qual busca retomar seus conhecimentos previamente desenvolvidos e estruturá-los de forma a serem compreensíveis para os estudantes.

Para exemplificar, olhamos para a presente análise do livro didático de Bohm para a Teoria Quântica. Considerando os complexos desenvolvimentos da teoria, as controvérsias quanto a suas interpretações e sua densa estrutura matemática, para a escrita de um livro didático dentro dessa temática é necessário ao autor empreender uma investigação nos fundamentos da teoria, sua estrutura interna, experimentos, interpretações, formalismos matemáticos, etc. A partir dessa investigação, o autor estrutura os conhecimentos em seu livro visando ao entendimento destes, e da teoria como um todo, por parte dos interlocutores. Ao nos voltarmos para os elementos identificados no enunciado de Bohm, pode-se caracterizar essa organização do conhecimento e o elemento construtivista empregado a partir do estilo adotado pelo autor. Como mencionamos no capítulo anterior, Bohm não postula os conceitos da Teoria Quântica; ele busca construí-los ao longo do enunciado – o que é diretamente citado pelo referido autor logo no prefácio da obra. Isto é, Bohm organiza e estrutura os conceitos clássicos visando salientar a necessidade de se introduzir os novos conceitos quânticos, de maneira a demonstrar o processo percorrido por esses conceitos no surgimento da Teoria Quântica.

Outro elemento que nos indica esse processo de organização do conhecimento, e o caracteriza como essencialmente construtivista, são as constantes retomadas e projeções feitas por Bohm ao longo do enunciado. Ao introduzir alguns capítulos, ele retoma os conhecimentos

desenvolvidos em capítulos anteriores e enfatiza a ligação destes com os conceitos que serão discutidos no novo capítulo. Observa-se que o autor projeta a discussão a ser desenvolvida no capítulo, indicando a rota seguida e futuras discussões em capítulos posteriores. Esses elementos não se fazem presentes apenas na introdução dos capítulos, mas também em seu desenvolvimento. Em cada capítulo, ao longo da construção dos conceitos, Bohm apresenta as relações com as discussões previamente desenvolvidas e as articulações necessárias para que os conceitos sejam interligados. Por fim, esse elemento também pode ser indicado por meio dos sumários e comparações entre conceitos apresentados ao longo do livro, o que evidencia a preocupação de Bohm em “construir” a teoria a partir de seus conceitos chave – ou, nas palavras do autor, em demonstrar como ela pode ser desenvolvida de forma natural.

De acordo com o plano geral delineado acima, uma ênfase incomum é colocada (especialmente na Parte I) em mostrar como a teoria quântica pode ser desenvolvida de maneira natural, partindo da teoria clássica previamente existente e indo passo a passo através dos fatos experimentais e linhas teóricas de raciocínio que levaram à substituição da teoria clássica pela teoria quântica (BOHM, 1951, p. iv).

A estrutura composicional adotada por Bohm em seu enunciado também nos fornece indícios dessa organização do conhecimento. Como mencionamos, a estrutura pode ser caracterizada a partir de uma perspectiva dialética materialista, na qual o autor começa pela construção da dimensão concreta da teoria, da realidade física que esta opera, e disso parte para sua dimensão abstrata, os formalismos e equacionamentos matemáticos necessários para sua operacionalização. Assim, como argumentos para os demais elementos da presente tese, a formulação de tal estrutura composicional implica uma revisão de conhecimentos e conceitos envolvidos na teoria em questão, visando sua estruturação a partir de uma perspectiva filosófica específica. Além da organização e estruturação do conhecimento exercida pelo autor ao formular seu enunciado, pode-se identificar que o livro didático de Bohm proporciona o mesmo processo aos seus interlocutores.

O ato de ensinar exige do professor uma preparação; ao se preparar para ensinar, o educador necessita retomar e estruturar o conhecimento adquirido ao longo de sua formação – seja quanto aos saberes a serem ensinados ou às perspectivas pedagógicas. Esses processos de resgatar e estruturar saberes possibilitam, quando acompanhados de reflexões críticas, que o educador desenvolva uma imagem, ou panorama, do conhecimento em questão, seus fundamentos, articulações e limitações. Quanto ao professor pesquisador, esses processos podem vir a favorecer sua atividade científica na medida em que proporcionam ao sujeito uma

reflexão crítica acerca das estruturas internas do conhecimento em questão e, também, de seu próprio entendimento desse conhecimento.

O que queremos indicar com essa primeira tese é que, para o professor pesquisador, a busca por “ensinar melhor”, isto é, por não apenas entender, mas também por se fazer entender quanto ao conhecimento, pode permitir ao sujeito “pesquisar melhor”. Partindo disso, chegamos à nossa segunda tese. Se tal unidade, ensinar pesquisando, permite ao sujeito uma reflexão crítica acerca do conhecimento, assim como um panorama geral deste, ela pode favorecer a identificação de anomalias no paradigma científico e contribuir para a pesquisa científica, na medida em que proporciona tanto uma reflexão quanto uma investigação frente ao paradigma da ciência normal. Diante disso, pode-se caracterizar a preparação para ensinar como um aspecto pedagógico-formativo do ensino de ciências, uma vez que tal preparação proporciona ao cientista educador uma reflexão crítica quanto às estruturas do conhecimento a ser ensinado. Isto é, ao preparar-se para a atividade educacional, o sujeito passa por um processo formativo próprio que lhe possibilita repensar os saberes e suas estruturas internas.

#### Criatividade e anomalias no livro didático

Como mencionamos no início do presente trabalho, a visão usual acerca do livro didático reside na noção de que este é um instrumento reprodutor da ciência normal (KUHN, 2017). Essa visão é questionada por Badino e Navarro (2017) ao olharem para os livros didáticos escritos próximos a períodos de revolução científica. Segundo os autores, esses livros podem conter expressões da real atividade científica, seu caráter investigativo e criativo.

Ao olharmos para o livro didático de Bohm, aqui analisado, podemos identificá-lo, em princípio, como escrito em um período de ciência normal. O livro provavelmente tenha sido escrito ao final da década de 40, publicado inicialmente em 1951, e pode ser considerado dessa forma tendo em vista que a primeira revolução quântica tem seu ápice ao final da década de 20, enquanto a segunda, ao final da década de 80. Contudo, Freire Jr. (2015) argumenta que as origens da segunda revolução quântica podem ser traçadas desde de seus primeiros protagonistas, como o próprio David Bohm, a partir de sua interpretação alternativa para a MQ publicada em 1952. Mesmo que a interpretação adotada no livro didático de Bohm diferencie-se da adotada na interpretação alternativa, pelo menos em um primeiro momento, o livro pode ser considerado como escrito próximo aos primeiros desenvolvimentos que levaram à segunda revolução quântica. De qualquer forma, o livro é escrito em meio a um século de importantes

revoluções, em um momento no qual a primeira revolução quântica estava estabilizada, sendo estendida e replicada, e, também, próximo a quando são apresentados os indícios de uma segunda revolução quântica.

Mesmo não sendo escrito em um período de revolução científica, podemos identificar no livro em análise alguns dos elementos mencionados por Badino e Navarro (2017). O primeiro ponto a se destacar é a identificação de uma possível anomalia na MQ, capítulo 6, seção 11, por meio de um experimento hipotético no qual Bohm sugere uma possível violação do princípio da incerteza, indicando que futuros experimentos como este podem ser um teste crucial para a teoria. Ele assume a completude da TQ, no entanto, não descarta a possibilidade de existirem anomalias e contradições na teoria, sugerindo possíveis rotas para futuras investigações. Essa discussão quanto a possíveis limites e contradições na TQ é acompanhada por outras relacionadas às noções fundamentais da teoria e suas interpretações. Ao longo do livro, Bohm se propõe a discutir as noções fundamentais da TQ a partir de sua natureza descontínua, incerta e estatística, comparando-a com as noções clássicas e indicando o limite e a correspondência entre as teorias quântica e clássica. O autor discute os fenômenos físicos a partir da Física Clássica, indicando o limite dessa descrição e a necessidade de se introduzir os conceitos quânticos – traz, com isso, comparações entre as descrições clássicas e quânticas. Ainda, Bohm se propõe a dialogar, a partir da complementaridade de Bohr, com as concepções que buscam retomar o determinismo e o realismo na TQ, como a proposição de variáveis ocultas e o argumento EPR, mesmo que as contrariando em defesa da complementaridade.

Pode-se traçar uma relação entre os questionamentos e sugestões de Bohm quanto à MQ em seu livro didático e sua posterior proposição de uma interpretação alternativa para o tema. Ressaltamos que as abordagens e interpretações dadas são radicalmente diferentes, no entanto, em ambos os trabalhos Bohm sugere o princípio da incerteza e a descrição matemática da teoria como possíveis pontas em aberto. No capítulo 5, antes de propor seu experimento hipotético no capítulo 6, ele (1951) argumenta que a autoconsistência da TQ depende de sua unidade, indicando que o abandono de qualquer um dos fundamentos da teoria quântica, indivisibilidade, probabilidade, dualidade e as restrições do princípio da incerteza, levaria a um abandono total da TQ. “Assim, todas as partes da teoria quântica se entrelaçam em uma estrutura tão unificada que é muito difícil conceber que abandonemos qualquer elemento, a menos que abandonemos toda a teoria quântica” (BOHM, 1951, p. 114).

No experimento, Bohm (1951, p. 135) argumenta que a descrição corpuscular da matéria leva a uma violação do princípio da incerteza, pontuando que “uma contradição do

princípio da incerteza em qualquer ponto tornaria insustentável toda a dualidade onda-partícula”. Entretanto, argumenta que, mesmo que a descrição corpuscular leve a uma possível contradição, a descrição ondulatória, por sua vez, é capaz de resolver o problema “de uma forma simples e natural sem induzir a qualquer inconsistência”. Assim, o autor conclui que “os aspectos ondulatórios da matéria são tão reais quanto os corpusculares” e que, “para obter uma teoria completa e consistente, devemos considerar ambos os aspectos, cada um em suas próprias condições” (1951, p. 136). Mesmo não assumindo uma anomalia na teoria, ao final do livro Bohm indica que experimentos como o proposto podem servir como testes cruciais para ela. Dessa forma, pode-se assumir que o livro didático de Bohm indica uma possível anomalia na teoria e apresenta possíveis rotas para a investigação do problema, mesmo assumindo a completude da teoria como um todo – o que enfatiza a dimensão formativa atrelada à preparação para ensinar, necessária ao cientista educador.

Outro fato a se destacar, e que nos indica a criatividade científica expressa pelo enunciado de Bohm, é o cruzamento entre suas concepções marxista-materialista e bohriana por meio de sua tentativa em formular uma imagem física da realidade quântica (capítulo 8). Como mencionado na seção 4.3, Bohm elabora seu enunciado a partir da perspectiva bohriana, a qual renuncia a elaboração de modelos e “imagens” físicas, mas, ao mesmo tempo, busca construir uma imagem da realidade a partir da MQ. Ele se opõe à renúncia bohriana de prover modelos físicos, embora adote sua interpretação em linhas gerais, trazendo um elemento realista para a descrição da teoria. Em sua posterior interpretação alternativa, Bohm afirma que a complementaridade exige a renúncia até mesmo de modelos matemáticos (1951, p. 168), o que não é explicitamente dito no livro didático. No entanto, enquanto as discussões no livro didático são voltadas a defender a interpretação da complementaridade, as dos posteriores artigos visam superá-la. Em suma, Bohm adota, em linhas gerais, a interpretação da complementaridade em seu livro didático, contudo, não se restringe a ela, propondo um olhar realista-materialista em sua direção.

Ao observarmos os trabalhos posteriores do autor, podemos identificar algumas similaridades entre o livro didático de Bohm e sua posterior interpretação alternativa, mesmo que estes tenham sido elaborados a partir de perspectivas distintas. Em primeiro lugar, em maior ou menor grau, Bohm apresenta uma leitura realista-materialista da teoria quântica em ambos os seus trabalhos. No livro didático, essa leitura é direcionada à interpretação da complementaridade, mas pode ser expressa também pela estrutura composicional dialética do enunciado. Já na interpretação posterior, essa leitura é feita sobre toda a teoria, de sua

formulação matemática até suas interpretações físicas. Outra similaridade encontrada é que, assim como já indicado, em ambos os trabalhos ele sugere o princípio da incerteza como possível fonte de uma contradição. No entanto, no livro didático, embora insinue uma possível anomalia, assume a posição da interpretação usual quanto à sua explicação, argumentando em favor desta, mas indicando possíveis futuras rotas de investigação sobre o problema; já nos artigos posteriores, indica o princípio como o ponto central da interpretação usual, visando superá-lo, propondo uma descrição determinista para a teoria.

De forma geral, o livro didático de Bohm distingue-se da usual imagem do livro didático enquanto mero reprodutor da ciência normal. Em vez de omitir a dimensão criativa da ciência e, com isso, a possível identificação de anomalias no paradigma, traz à tona elementos como argumentações, suposições, hipóteses e interpretações relacionadas à teoria enunciada – elementos que também se fazem presentes na atividade científica. Nesse sentido, identifica-se uma possível expressão da criatividade científica enunciada por meio do livro didático de Bohm, o qual busca não apenas reproduzir o conhecimento já desenvolvido, mas também explorar suas possibilidades. O livro não indica propriamente uma futura revolução científica, mas, a partir dos elementos mencionados acima, indica diferentes olhares para a Teoria Quântica, e alguns deles apresentam indícios de uma possível anomalia na teoria.

Frente ao exposto, encontram-se indícios de que o livro didático pode ir além do que, muitas vezes, é. O livro didático não é necessariamente um instrumento reprodutor da ciência normal, o qual omite a criatividade científica e é útil apenas em regimes de treinamento. A partir da presente análise, argumentamos que o livro didático pode ser um agente ativo no processo científico, trazendo elementos da atividade científica para o ensino de ciências e propondo o contato do estudante de ciência com as questões que permeiam sua prática. Quanto ao professor-pesquisador, pode-se identificar que a escrita de um livro didático, assim como o ato de ensinar, proporciona-lhe uma reflexão quanto ao conhecimento em questão e ao paradigma científico que o sustenta – o que pode, em princípio, permitir que ele identifique possíveis anomalias e contradições no paradigma científico. Ainda, o professor-pesquisador tem a opção de explicitar ou ocultar os problemas identificados. Ao optar por explicitar, tem-se a possibilidade de articulá-las e discuti-las, demonstrando elementos intrínsecos à criatividade científica.

## A reciprocidade entre ensinar e pesquisar

Nossa última tese consiste em assumir que *há uma reciprocidade entre os atos de ensinar e pesquisar*. No início do presente trabalho afirmamos que a relação entre pedagogia e pesquisa é usualmente vista a partir de uma imagem clássica da ciência (REN; HYMAN, 2021), a qual estabelece uma distinção entre a atividade pedagógica educacional e pesquisa científica. Nesse sentido, a atividade científica é responsável pela produção e validação do conhecimento, e a pedagógica, pela sua reprodução e disseminação. No entanto, ao longo do estudo buscamos indicar, a partir da análise bakhtiniana do livro didático de Bohm, que a atividade pedagógica educacional e a pesquisa científica podem ser aproximadas e, até mesmo, mutuamente condicionadas. Nesta última tese, o objetivo é discutir de que forma essa reciprocidade entre ensinar e pesquisar pode ser caracterizada. Partindo das investigações de Kuhn, como discutido no início do nosso trabalho, a atividade científica desenvolve-se sobre um paradigma comum até que sejam identificadas anomalias nesse paradigma, o que resulta num período de revolução científica. Nesse período, tem-se o surgimento de novas hipóteses e teorias que, quando maduras o suficiente, se tornam o novo paradigma e dão início a um novo período de ciência normal.

Kuhn atribui um papel central à pedagogia na estrutura da ciência, sendo esta responsável pelo treinamento do futuro cientista para a reprodução da ciência normal (KAISER; WARWICK, 2005). A descrição de Kuhn quanto ao proceder histórico das teorias científicas nos parece adequada para pensar o andamento da atividade científica, no entanto, a noção de pedagogia que ela traz nos parece um tanto quanto reducionista. É importante destacar que a visão de Kuhn situa-se sobre suas próprias experiências enquanto aluno e pesquisador, além de descrever adequadamente o que usualmente encontramos em contextos educacionais. Contudo, argumentamos que a ação pedagógica no ensino de ciências pode ir muito além de uma mera reprodução da ciência normal, em especial a partir de investigação acerca da relação entre ensinar e pesquisar exercida por um mesmo sujeito. Dessa investigação podem surgir reflexões que nos levem a repensar as práticas pedagógicas de forma a trazer nelas elementos característicos da atividade científica e, simultaneamente, repensar o papel das práticas pedagógicas para um cientista – caracterizando, assim, a condição do Cientista Educador, aquele que não somente busca descrever e pensar as teorias científicas, mas também se fazer entender perante seus estudantes.



O Cientista Educador, dessa forma, é aquele que toma a ciência como fonte de exposição didática, que se debruça na preparação do aspecto científico voltado ao ensino, buscando tanto compreender o conhecimento em questão quanto se fazer entender diante do público. A preparação para ensinar, assim, proporciona um aspecto pedagógico-formativo à atividade desenvolvida por um cientista e, simultaneamente, um aspecto científico à ação pedagógica exercida por esse mesmo sujeito. Assim, ao tomar o ensino como preparação pode-se caracterizar a condição do Cientista Educador.

Referente à relação entre o sujeito enquanto pensador que visa investigar sua área do conhecimento e o mesmo sujeito enquanto educador que visa torná-la compreensível, Dalbosco (2011) discorre sobre Immanuel Kant enquanto educador e filósofo. O autor indica uma recíproca relação entre ambos, na qual um depende da existência do outro em um mesmo sujeito.

Isso mostra, então [...] a profunda imbricação que ocorre desde o início de sua atividade profissional entre o pensar filosófico e o experienciar pedagógico, entre o filósofo e o pedagogo, e que um, além de não ocorrer isoladamente, depende da presença do outro para poder tornar-se compreensível (DALBOSCO, 2011, p. 27).

Frente a isso, identificamos uma estreita relação entre o sujeito enquanto pesquisador e educador, uma inter-relação entre esses dois atos usualmente vistos como distintos. Em Bakhtin, observa-se que os diferentes campos de ação social, como o da pesquisa e o do ensino, são interligados pelo sujeito que age em ambos. Isto é, no agir responsável, o sujeito traz consigo todos os aspectos de sua vida e os infunde aos elementos da cultura envolvidos no ato. Ao agir em meio ao contexto da pesquisa científica, o Cientista Educador traz elementos de suas ações pedagógicas e vice-versa. Nesse contexto, pode-se caracterizar uma primeira inter-relação entre as duas atividades exercidas pelo mesmo sujeito; o mesmo Ser que ensina, pesquisa, e essas atividades estão intrinsecamente ligadas pela ação responsável. No entanto, de que forma os elementos característicos de uma dessas atividades podem estar presentes, e até mesmo, favorecer a outra?

Na nossa primeira tese, argumentamos que o ato de ensinar implica revisitar conhecimentos e reelaborá-los, o que pode favorecer a pesquisa científica na medida em que permite ao sujeito refletir sobre os saberes aparentemente já consolidados – possibilitando, até mesmo, a identificação de anomalias no paradigma científico. Na segunda tese, argumentamos que há elementos da atividade científica, como a criatividade, a formulação de hipóteses e as articulações conceituais, que podem ser expressos no livro didático e, assim, trazidos para o

contexto educacional. Enquanto o ensino proporciona para a pesquisa a oportunidade de revisitar conhecimentos e fazer uma reflexão crítica sobre eles, a pesquisa proporciona para o ensino a ação criativa, a articulação de conceitos e a formulação de hipóteses.

Com isso, queremos indicar que *há uma dimensão pedagógica inerente à atividade científica e uma dimensão científica inerente à ação pedagógica*. Quando as duas atividades são exercidas por um mesmo sujeito, pode-se supor um diálogo entre ambas que vem a enriquecer a ação do sujeito. Ensinar e pesquisar ciências são, para um mesmo sujeito, atividades não só complementares, mas também necessárias uma à outra. Quando juntas, essas atividades implicam ao cientista educador uma profunda reflexão sobre o conhecimento, até mesmo, para além disso, uma profunda reflexão sobre sua própria condição de sujeito que busca tanto entender quanto se fazer entender perante suas ideias. Isto, por sua vez, vem a favorecer tanto sua atividade de pesquisa quanto de ensino.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

David Joseph Bohm foi um importante pensador do século XX, o qual buscou investigar não somente a Física, sua área de formação e atuação profissional, mas também a própria compreensão humana quanto à natureza. Ao olharmos para seus aspectos biográficos, encontramos um rico acervo de discussões que vão desde a Física de Plasmas até a busca por uma ontologia para a Mecânica Quântica, passando por trabalhos relacionados aos fundamentos da Física, a compreensão humana perante a natureza, a criatividade e o diálogo. Freire Jr (2019) define David Bohm como “uma vida dedicada ao entendimento do mundo quântico”, contudo, podemos pensar em Bohm para além desta definição, isto é, como uma vida dedicada não somente ao entendimento da quântica, mas também ao entendimento do homem e sua busca pelo conhecimento, por compreender a natureza. Podemos, assim, caracterizar Bohm como um pensador apaixonado pelo mundo e pelos homens, pela natureza, a ciência, e sua relação com o conhecimento humano.

No presente trabalho apresentamos uma investigação acerca da relação entre ensinar e pesquisar ciências a partir de uma análise metalinguística do livro didático *Quantum Theory* (1951) escrito por Bohm a partir de seus anos de docência em Princeton. Para tal análise metalinguística, nos apoiamos na filosofia da linguagem de M. Bakhtin, a qual nos permitiu identificar elementos discursivos e epistêmicos no enunciado de Bohm e, também, traçar paralelos entre estes elementos com os aspectos relacionados à vida de Bohm e ao desenvolvimento histórico da Teoria Quântica. Destes elementos, foi identificado o estilo do enunciado como voltado à construção e justificação de conceitos; a estrutura composicional como uma dialética entre o concreto e o abstrato; as vozes subjacentes como referentes à interpretação da complementaridade lida sob a ótica realista; e o tema direcionado aos fundamentos e limites da Física. Estes elementos nos indicam os aspectos da vida de Bohm, suas inclinações teóricas/ideológicas, que permeiam seu enunciado para a Teoria Quântica.

A partir da análise desenvolvida, no capítulo 5 discutimos sobre a reciprocidade entre ensinar e pesquisar sob três teses centrais, buscando indicar possíveis futuras investigações acerca da relação entre ensino e pesquisa. Em nossa primeira tese, sugerimos que, para o Cientista Educador, a preparação para ensinar pode caracterizar um aspecto pedagógico-formativo do ensino de ciências. Tal preparação pode vir a favorecer a pesquisa desenvolvida por tal Cientista Educador na medida em que proporciona a este o revisitar de conceitos já consolidados e, a partir disso, uma reflexão crítica quanto às estruturas do conhecimento. Em

nossa segunda tese, indicamos que o livro didático pode expressar a criatividade científica e possíveis anomalias no paradigma científico. Isto é, ao invés de simplesmente reproduzir o paradigma científico, o livro didático pode servir como fonte de reflexões quanto a este, indicando possíveis novas abordagens.

As duas primeiras teses podem ser vinculadas tendo em vista que o aspecto pedagógico-formativo atrelado à preparação para ensinar, assim como o revisitar de conceitos, pode proporcionar ao Cientista Educador expressar sua avaliação própria do conhecimento em questão em sua ação pedagógica. Com isso, o livro didático escrito a partir das experiências docentes de Bohm acaba por expressar os questionamentos do autor quanto à teoria discutida, suas inquietações, dúvidas, suposições e alternativas para os problemas ainda não resolvidos.

Por fim, em nossa terceira tese buscamos indicar que há uma reciprocidade entre os atos de ensinar e pesquisar. Isto é, um diálogo entre pedagogia e pesquisa na singularidade de cada ato do Cientista Educador que indica uma dimensão pedagógica inerente à atividade científica e uma dimensão científica inerente à ação pedagógica. Com isso, gostaríamos de indicar que futuras investigações acerca da relação entre a pesquisa e a pedagogia podem prosseguir por vias deste diálogo entre o exercício de ambos os ofícios em um mesmo sujeito, o qual denominamos de Cientista Educador.

## REFERÊNCIAS

- BADINO, Massimiliano; NAVARRO, Jaume. Pedagogy and Research. Notes for a Historical Epistemology of Science education. In: BADINO, Massimiliano; NAVARRO, Jaume (Eds.), *Research and Pedagogy: a History of Quantum Physics through Its Textbooks*. Edition Open Access, 2017. p. 3–18
- BAKHTIN, Mikhail M. *Os gêneros do discurso*. São Paulo: Editora 34, 2016.
- BAKHTIN, Mikhail M. *Para uma filosofia do ato responsável*. 2. ed. São Carlos: Pedro e João Editores, 2010.
- BELL, John S. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics Publishing*. v. 1, n. 3, p. 195-200, 1964.
- BOHM, David. *Quantum Theory*. New York: Prentice-Hall, 1951c
- BOHM, David. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables-I. *Phys. Rev.*, v. 85, n. 2, p. 166–179, 1952a.
- BOHM, David. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of hidden variables-II. *Phys. Rev.* v. 85, n. 2, p. 180–193, 1952b.
- BOHM, David. *Causality and chance in modern physics*. Foreword by Louis De Broglie. London: Routledge and Paul, 1957.
- BOHM, David; FOLDY, Leslie L. The theory of the synchrotron. *Physical Review*, v. 70, n. 5, p. 249–258, 1946a.
- BOHM, David; BURHOP, Eric H.S.; MASSEY, Harrie S.W.; WILLIAMS, Robert. W. A study of the arc plasma. In: GUTHRIE, Andrew; WAKERLING, Raymond K. (Eds.). *The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields*. New York: McGraw-Hill, 1949a. p. 173–333
- BOHM, David; BURHOP, Eric H.S.; MASSEY, Harrie S.W. The use of probes for plasma exploration in electromagnetic fields. In: GUTHRIE, Andrew; WAKERLING, Raymond K. (eds.). *The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields*. New York: McGraw-Hill, 1949b. p. 13-76
- BOHM, David; GROSS, Eugene. Theory of plasma oscillations. A. Origin of medium-like behavior. *Physical Review*, v. 75, n. 12, p. 1851–1864, 1949d.
- BOHM, David; GROSS, Eugene. Theory of plasma oscillations. B. Excitation and damping of oscillations. *Physical Review*, v. 75, n. 12, p. 1864–1876, 1949e.
- BOHM, David; PINES, David. A collective description of electron interactions. 1. Magnetic Interactions. *Physical Review*, v. 82, n. 5, p. 625–634, 1951a.
- BOHM, David; PINES, David. A collective description of electron interactions. 2. Collective vs Individual. *Physical Review*, v. 85, n. 2, p. 625–634, 1951b.

- BOHM, David; PINES, David. A collective description of electron interactions. 3. Coulomb interactions in a degenerate electron gas. *Physical Review*, v. 92, n. 3, p. 609–625, 1953a.
- BOHR, Niels. On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philos. Mag.* v. 26 n. 1, 1913.
- BOHR, N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*. v. 48, p. 696-702, 1935 b.
- BUNGE, Mario. The Einstein-Bohr debate over quantum mechanics: Who was right about what? *Lecture Notes in Physics*, v. 100, p. 204–219, 1979.
- CARDOSO, Daniela. A dialética nos escritos do círculo de Bakhtin. *Letrônica*. v. 9, n. esp. p. 30-46, 2016.
- CREPALDE, Rodrigo dos S.; AGUIAR JR, Orlando. G. A formação de conceitos como ascensão do abstrato ao concreto: da energia pensada à energia vivida. *Investigações em Ensino de Ciências*. v. 18, n. 2, p. 299-325, 2013.
- DALBOSCO, Claudio A. *Kant e a Educação*. Belo Horizonte: Autêntica Editora, 2011.
- EINSTEIN, Albert. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. 1905b. Disponível em: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/100> . Acesso em: 20 out. 2019.
- EINSTEIN, Albert. On The Electrodynamics Of Moving Bodies. 1905a. Disponível em: <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-trans/154>
- EINSTEIN, Albert; PODOLSKY, Boris; ROSEN, Nathan. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, v. 47, p. 777-780, 1935.
- FOUCAULT, Michel. *A Hermenêutica do Sujeito*. São Paulo: Martins Fontes, 2004.
- FREIRE JR., Olival. *David Bohm: A Life Dedicated to Understanding the Quantum World*. Cham: Springer, 2019.
- FREIRE JR., Olival. *The Quantum Dissidents*. Berlin: Springer, 2015.
- FREIRE JR, Olival; PESSOA JUNIOR, Osvaldo; BROMBERG, Joan Lisa. *Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais*. Edueph, 2011.
- GRIFFITHS, David J. *Mecânica Quântica*. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- GROSS, Eugene. Collective variables in elementary quantum mechanics. In: HILEY, Basil J.; PEAT, Francis D. *Quantum Implications: Essays in Honour of David Bohm*. New York: Routledge, 1987. p. 46-65
- HEISENBERG, Werner K. *A parte e o todo*. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- HOLQUIST, Michael. *Dialogism*. 2. ed. New York: Routledge, 2002.

JAMMER, Max. David Bohm and His Work - On the Occasion of His Seventieth Birthday. *Foundations of Physics*. v. 18, n. 7, p. 691-699, 1988.

JOHANSSON, Anders; ANDERSSON, Staffan; SALMINEN-KARLSSON, Minna; ELMGREN, Maja. “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. *Cultural Studies of Science Education*. v. 13, p. 205–226, 2018

KAISER, David. Shut up and calculate. *Nature*. v. 505, p. 153-155, 2014.

KAISER, David; WARWICK, Andrew. Conclusion: Kuhn, Foucault, and the Power of Pedagogy. In: KAISER, David. (Ed). *Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspectives*. Cambridge: The MIT Press, 2005. p. 393 - 409.

KUHN, Thomas. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University Press, 1962.

LIMA, Nathan. W.; SOUZA, Bruno B.; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio J. H. Um Estudo Metalinguístico sobre as Interpretações do Fóton nos Livros Didáticos de Física Aprovados no PNLDEM 2015: Elementos para uma Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 1, n. 2, 2021, p. 331–364, 2018.

LIMA, Nathan W.; NASCIMENTO, Matheus M.; CAVALCANTI, Claudio J. H.; OSTERMANN, Fernanda. Louis de Broglie's wave-particle duality: from textbooks' blackboxes to a chain of reference presentation. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, e20190134, 2020.

LIMA, Nathan W.; NASCIMENTO, Matheus M.; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio J. H. A Teoria do Enunciado Concreto e a Interpretação Metalinguística: Bases Filosóficas, Reflexões Metodológicas e Aplicações para os Estudos das Ciências e para a Pesquisa em Educação em Ciências. *Investigações em Ensino de Ciências*. v. 24, n. 3, p. 258-281, 2019.

MARTINS, Isabel. Analisando livros didáticos na perspectiva dos Estudos do Discurso: compartilhando reflexões e sugerindo uma agenda para a pesquisa. *Pro-Posições* v. 17, n. 1, p. 117–136, 2016.

MARX, Karl. ENGELS, Friedrich. *A Ideologia Alemã*. 2 ed. São Paulo: Martins Fontes, 2001.

MORSON, Gary S., EMERSON, Caryl. *Mikhail Bakhtin: Creation of a Prosaic*. Stanford: University Press, 1990.

PEAT, David. *Infinite Potential: the life and times of David Bohm*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1996.

PHILLIPS, Anna McLean; WATKINS, Jessica; HAMMER, David. Beyond “asking questions”: problematizing as a disciplinary activity. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 55, n. 7, p. 982-998, 2018.

PHILLIPS, Anna McLean; WATKINS, Jessica; HAMMER, David. Problematizing as a scientific endeavor. *Physical Review Physics Education Research*, v. 13, n. 2, p. 020107, 2017.

RENN, Jürgen; HYMAN, Malcolm. The Globalization of Modern Science. In: RENN, Jürgen. (Ed.), *The Globalization of Knowledge in History*. Edition Open Access, 2012. p. 561-604.

SELLES, Sandra E.; FERREIRA, Marcia S. Influências histórico-culturais nas representações sobre as estações do ano em livros didáticos de ciências, *Ciência & Educação*, v. 9, n. 2, p. 101-110, 2003.

SIMON, Josep. Textbooks. In: LIGHTMAN, Bernard. *A Companion to the History of Science*. John Wiley & Sons Ltd, 2016, p. 400-414.

SOMMERFELD, Arnold. Zur Quantentheorie der Spektrallinien, *Annalen der Physik* v. 356, n. 17, p. 1-94, 1916.

VOLOSHINOV, Valentin N. *Marxism and the Philosophy of Language*. New York: Seminar Press, 1986.

VOLOSHINOV, Valentin N. *Freudianism. A Critical Sketch*. Indianapolis. Indiana: University Press, 1987.

YAGUELLO, Marina. Introdução. In: BAKHTIN, Mikhail. *Marxismo e Filosofia da Linguagem*. São Paulo: Hucitec, 2006. p. 11-21.