

Detectando a Construção do Conhecimento via Teoria dos Códigos de Legitimação: Um Estudo da Densidade Semântica em Livros Didáticos de Mecânica Quântica⁺

Marina Valentim¹

Faculdade de Educação – Universidade Federal de Catalão
Catalão – GO

Eduardo Fleury Mortimer¹

Faculdade de Educação – Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte – MG

Resumo

O trabalho investiga o conhecimento disponibilizado em livros didáticos de Mecânica Quântica, utilizados no ensino superior, com foco na definição da função de onda. Como referencial teórico-metodológico, utiliza-se a Teoria dos Códigos de Legitimação (TCL), especificamente a dimensão semântica e o conceito de densidade semântica, que permitem analisar os diferentes níveis de complexidade e condensação dos significados presentes nos textos. A pesquisa apresenta um dispositivo de tradução composto por cinco níveis de densidade semântica aplicado à análise de seis seções extraídas de três obras amplamente utilizadas no ensino de mecânica quântica: Lições de Física (Feynman, Leighton e Sands), Física Quântica (Eisberg; Resnick) e Mecânica Quântica (Griffiths). As análises contemplaram tanto seções dedicadas à interpretação conceitual da função de onda quanto seções voltadas à apresentação da Equação de Schrödinger. Os resultados evidenciam diferenças significativas na organização do conhecimento entre as obras. Os resultados também revelam diferentes formas de organização do conhecimento: Feynman, Leighton e Sands enfatizam conceitos quânticos e explicações de caráter narrativo e conceitual; Eisberg e Resnick

⁺ Detecting Knowledge Construction through Legitimation Code Theory: A Study of Semantic Density in Quantum Mechanics Textbooks

^{*} Recebido: 2 de junho de 2026.

Aceito: 14 de agosto de 2026.

Publicado: 31 de agosto de 2026.

¹ E-mails: marinote@ufcat.edu.br; efmortimer@gmail.com

introduzem a função de onda a partir de referências predominantes à física clássica; e Griffiths combina abordagens conceituais e matemáticas, atribuindo centralidade ao formalismo matemático e à resolução de problemas. A análise dos perfis semânticos mostrou que textos que apresentam ondas semânticas favorecem a articulação entre os níveis distintos de densidade semântica, variando a complexidade, e, com isso, potencializando a construção do conhecimento. Em contrapartida, seções caracterizadas por longos trechos, em níveis elevados de densidade semântica, especialmente, no nível simbólico, tendem a dificultar o acesso aos significados e à compreensão conceitual. A organização semântica dos textos influencia diretamente as possibilidades de aprendizagem, destacando a importância de materiais didáticos que promovam movimentos entre diferentes níveis de densidade semântica.

Palavras-chave: *Ensino de Mecânica Quântica; Teoria dos Códigos de Legitimação; Densidade Semântica; Função de Onda.*

Abstract

This study investigates the knowledge presented in Quantum Mechanics textbooks used in higher education, focusing on the definition of the wave function. The theoretical and methodological framework is based on Legitimation Code Theory (LCT), specifically the semantic dimension and the concept of semantic density, which enables the analysis of different levels of complexity and condensation of meanings within texts. The study presents a translation device composed of five levels of semantic density and applies it to the analysis of six sections extracted from three widely used Quantum Mechanics textbooks: The Feynman Lectures on Physics (Feynman, Leighton, & Sands), Quantum Physics (Eisberg & Resnick), and Introduction to Quantum Mechanics (Griffiths). The analysis encompassed both sections dedicated to the conceptual interpretation of the wave function and sections focused on the presentation of the Schrödinger equation. The results also reveal significant differences in the organization of knowledge across the textbooks. Feynman, Leighton, and Sands emphasize quantum concepts and employ narrative and conceptual explanations; Eisberg and Resnick introduce the wave function primarily through references to classical physics; and Griffiths combines conceptual and mathematical approaches, placing strong emphasis on mathematical formalism and

problem solving. The analysis of semantic profiles showed that texts characterized by semantic waves promote articulation across different levels of semantic density, varying the complexity of meanings and thereby enhancing knowledge building. In contrast, sections characterized by extended passages at high levels of semantic density, particularly at the symbolic level, tend to hinder access to meanings and conceptual understanding. The findings indicate that the semantic organization of textbook discourse directly influences learning opportunities, highlighting the importance of instructional materials that promote movement across different levels of semantic density.

Keywords: *Quantum Mechanics Education; Legitimation Code Theory; Semantic Density; Wave Function.*

I. Introdução

O ensino da mecânica quântica representa um dos maiores desafios na formação de estudantes de Física, sobretudo pela natureza abstrata e contraintuitiva de seus conceitos fundamentais. A estrutura conceitual da teoria quântica rompe com a experiência cotidiana e exige dos alunos uma reestruturação das concepções construídas a partir da física clássica (Greca; Herscovitz, 2011; Pospiech, 2003; Singh; Marshman, 2015). Compreender fenômenos quânticos requer, portanto, uma mudança de paradigma em relação ao pensamento determinista da física clássica, tornando indispensável um ensino que vá além da mera manipulação matemática e privilegie a compreensão conceitual. Entretanto, o formalismo matemático complexo e a interpretação probabilística, constituem barreiras adicionais à aprendizagem e à compreensão dos estudantes (Greca; Freire Júnior, 2003; Lin; Singh, 2010; McKagan *et al.*, 2009). Outro fator que dificulta o processo de ensino-aprendizagem é a ausência de fenômenos diretamente observáveis, uma vez que muitos conceitos da mecânica quântica não possuem correspondentes empíricos perceptíveis, o que restringe a experimentação e o apoio visual frequentemente utilizados no ensino de física. Soma-se a esses aspectos a insuficiente formação docente; muitos professores não dominam adequadamente os conceitos quânticos nem dispõem de estratégias didáticas adequadas para abordá-los em sala de aula (Fanaro; Otero; Moreira, 2009; Lobato; Greca, 2005).

Os materiais didáticos disponíveis para o ensino superior, em geral, mantêm uma abordagem fortemente formalista, centrada na resolução de problemas e no domínio técnico de equações, com pouca ênfase nas dimensões conceituais, epistemológicas e interpretativas da teoria quântica (Greca; Freire Júnior, 2011; Mohan, 2020). Os livros didáticos são instrumentos em que o discurso científico é apresentado de forma didática, por meio dos vários modos que o constituem: escrita, imagens, gráficos, tabelas e equações matemáticas. As disciplinas universitárias estruturam-se baseadas nos conhecimentos disponibilizados nos livros, que são

fonte de pesquisa para estudantes e fonte de consulta para professores. Os livros escolhidos em disciplinas de curso superior influenciam tanto no que o estudante aprende quanto no que o professor ensina. Os professores utilizam os livros como fonte de pesquisa agregador de conhecimento e como fonte para a estruturação das aulas, além de material para recordação de assuntos que serão ministrados em sala. A forma como os conteúdos são apresentados nos livros didáticos de mecânica quântica assume papel central, pois esses materiais orientam, tanto a prática pedagógica quanto a aprendizagem conceitual, tornando-se, na prática, uma das principais fontes de conhecimento científico na formação inicial e continuada de professores (Ogan-Bekiroglu, 2007; Greca; Moreira; Herscovitz, 2001).

Este trabalho tem como objetivo principal investigar o conhecimento disponibilizado em seções de livros-textos de mecânica quântica, usados no ensino superior, utilizando-se de um referencial sociológico advindo do realismo social. Esse referencial valoriza a dimensão epistêmica do conhecimento e apresenta uma ferramenta de análise, a Teoria dos Códigos de Legitimação (TCL) (Maton; Hood; Shay, 2016). A ferramenta de análise epistêmica possui 3 dimensões que têm sido exploradas: Especialização, Semântica e Autonomia, (Maton; Hood; Shay, 2016). Cada uma dessas dimensões possui seus próprios códigos e conceitos, que são usados para analisar o conhecimento. Essas dimensões podem ser usadas separadamente ou de forma articulada com as outras, dependendo do trabalho a ser desenvolvido. Para esta pesquisa, utilizaremos a dimensão semântica como ferramenta de análise, explorando um dos seus códigos: a densidade semântica (DS).

Todas as seções analisadas definem a função de onda e foram retiradas dos livros didáticos de mecânica quântica para o ensino superior, mais utilizados por algumas das principais universidades do Brasil: Mecânica Quântica de (Griffiths, 2011); Física Quântica de (Eisberg; Resnick, 1979) e Lições de Física de (Feynman; Leighton; Sands, 2008). A escolha das seções dos livros que definem a função de onda se justifica pelo fato de a função de onda ser um conceito fundamental da mecânica quântica, que alicerça a compreensão do comportamento quântico dos sistemas físicos. A função de onda é um elemento que sintetiza a estrutura teórica da mecânica quântica e permite a transição entre o formalismo matemático e a interpretação física dos fenômenos. A função de onda constitui a base para o cálculo de grandezas observáveis e para a compreensão probabilística do comportamento das partículas.

O conceito de função de onda está no cerne da formulação da mecânica quântica. A 'função de onda' é a quintessência para a obtenção de quantidades fisicamente mensuráveis, como probabilidade, valor esperado, incerteza etc. Em outras palavras, uma formulação extremamente importante em mecânica quântica, que é um ingrediente crucial no estabelecimento de uma correspondência entre resultados teóricos e experimentos” (Chhabra; Das, 2017, p. 3).

II. Referencial Teórico

O referencial teórico utilizado nesta pesquisa é o da Teoria dos Códigos de Legitimação (TCL), que apresenta ferramentas sociológicas para o estudo da prática, e que considera o conhecimento produzido socialmente. A linguagem científica disponibilizada nos livros didáticos, para definir a função de onda, será, então, caracterizada pela **DS**, uma das variáveis da dimensão semântica.

A densidade semântica (DS) refere-se ao nível de complexidade dos significados de um texto, seja ele oral ou escrito, ou, de forma mais ampla, à complexidade das práticas (Martin; Maton; Doran, 2020). Quanto mais condensados forem os significados, mais forte será a DS; quanto menos condensados, mais fraca ela será. Essa condensação pode ocorrer por meio de símbolos, teorias ou conceitos, de modo que a força da DS aumenta à medida que um maior número de significados é reunido nessas formas de representação. Outra maneira de compreender a DS é por meio da noção de **relacionalidade**, entendida como a quantidade de relações estabelecidas entre um significado e outros significados. Quanto maior o número de relações mobilizadas, mais forte será a densidade semântica (Martin; Maton; Doran, 2020). Nessa perspectiva, a DS constitui um continuum de forças que pode ser dinamizado, tanto em direção ao seu fortalecimento, por exemplo, ao passar de um símbolo simples para um conceito mais complexo, quanto ao seu enfraquecimento, quando conceitos complexos são desmembrados em termos mais simples (Martin; Maton; Doran, 2020).

Já existe, no Brasil, uma diversidade de trabalhos usando a LCT para analisar diferentes aspectos do ensino de Física e Química, vários com foco na dimensão semântica. Dentre esses trabalhos, destacamos o artigo de Bochecho *et al.* (2022), que trata das estruturas físico-matemáticas e da abordagem da matemática no ensino de física usando a DS.

A Teoria dos Códigos de Legitimação utiliza-se de dispositivos de tradução que permitem, por exemplo, que essas considerações sobre a complexidade dos significados sejam traduzidas por meio de observáveis, que podem, então, serem usados para verificar as variações de DS numa aula ou num texto escrito. Os dispositivos de tradução permitem, então, traduzir esses aparatos teóricos da TCL em variáveis observáveis.

III. O dispositivo de tradução

Para esta pesquisa, foi desenvolvido um dispositivo de tradução aplicado à física, explicitado a seguir (tabela 1), baseado no trabalho de Dos Santos e Mortimer (2019), que desenvolveram um dispositivo semelhante aplicado a conhecimentos químicos. O dispositivo de tradução foi desenvolvido, considerando cinco níveis de DS, do mais forte (5) ao mais fraco (1), para analisar as seções dos livros didáticos. As unidades de análise foram os períodos do texto, constituídos por uma ou mais orações. Na delimitação do período, considera-se de um ponto final ao seguinte.

Para a construção do dispositivo de tradução, usamos uma distinção entre teoria e conceito. A teoria consiste num conjunto de hipóteses falseáveis, confrontadas entre si, e, com os fatos que constituem evidências científicas; e o conceito pode ser definido como uma noção ou ideia, uma representação geral e abstrata de uma realidade. Nessa perspectiva, uma teoria pode conter vários conceitos, e, nesse sentido, é mais ampla e mais complexa do que um único conceito.

Na visão de Bruner (1990), há dois modos de funcionamento cognitivo, e esses modos constroem realidades, ordenando a experiência cada um à sua maneira: o modo paradigmático, que expressa o pensamento lógico-científico, e o modo narrativo, que aborda a maneira pela qual as intenções humanas se comportam nas mais diversas situações. Apesar de, neste trabalho, a linguagem seguir o modo paradigmático, na maioria dos casos, isso não é uma regra geral. A narrativa é usada, principalmente, no livro *Lições de Física*, de Feynmann, Leighton e Sands (1964), para pontuar observações sobre a história da mecânica quântica e aspectos particulares que os autores querem destacar.

Neste trabalho usaremos o sentido atribuído por Bruner (1990) para as narrativas. Segundo esse autor, uma narrativa requer quatro características gramaticais cruciais: ação humana ou agenciabilidade, no sentido de ação direcionada a objetivos controlados por agentes; em que uma ordem sequencial seja estabelecida e mantida; uma sensibilidade ao que é canônico e ao que viola a canonicidade; e a perspectiva do narrador, cuja voz sempre está presente.

A tabela 1 apresenta o dispositivo de tradução para a análise da DS, que foi utilizado, considerando cada período do texto, ao qual foi atribuído um dos níveis de DS, com valores que variaram de 1 a 5. O nível mais alto de DS, o nível 5, é a forma simbólica, denominado **Simbólico**, no qual encontram-se as expressões matemáticas, as equações e os gráficos. O nível 4 foi chamado de **Teórico**, no qual a explicação do conteúdo físico é feita utilizando-se de teorias físicas, como, por exemplo, a associação da função de onda com o princípio de Broglie. O nível 3, denominado **Conceitual**, requer a compreensão de conceitos físicos, que são mais simples do que as teorias do nível 4, para a compreensão do conteúdo, como, por exemplo, o conceito de probabilidade para o entendimento da definição da função de onda. O nível 2, chamado de **Narrativo**, relaciona fatos, históricos ou não, narrados na linguagem comum. O nível mais fraco de DS, nível 1, denominado **Metacomentário**, está relacionado às partes do texto em que o autor faz comentários sobre a estrutura textual e tem objetivo de guiar o leitor na compreensão da estrutura e dos principais conceitos que serão desenvolvidos ao longo do texto. Com objetivo de caracterizar os movimentos de fortalecimento e enfraquecimento da DS, foram traçados os gráficos com perfis semânticos, que podem ser visualizados por meio das ondas semânticas (representadas na seção a seguir).

Há que se notar que os níveis 1 e 2 não se referem ao conhecimento físico propriamente dito, mas ao modo como esse conhecimento se articula com outros fatos narrados (na forma narrativa, nível 2); ou ainda, a estratégias de construção textual (na forma metacomentário). Isso não invalida a sua consideração, pois são esses elementos narrativos e textuais que dão

coerência ao texto que está sendo construído, e esse texto, por sua vez, expressa conhecimento de mecânica quântica.

Tabela 1: Níveis de densidade semântica (DS) para o conhecimento físico.

Densidade Semântica	Nível	Forma	Descrição	Exemplos
Forte ↑ ↓ Fraco	5	Simbólica	Equações, diagramas, gráficos	Equação matemática da função de onda.
	4	Teórica	Requer compreensão de teorias físicas para explicar o conteúdo.	Associação da função de onda com o princípio de conservação de energia.
	3	Conceitual	Requer compreensão de conceitos físicos para explicar o conteúdo.	Associação de conceitos quânticos isolados (probabilidade, vetor de estado, amplitude) com o conteúdo apresentado. Compreensão de conceitos físicos simplificados e sua relação com o conteúdo.
	2	Narrativa	Relaciona fatos e ideias narrados na linguagem comum.	Associação entre a função de onda e exemplos do dia a dia.
	1	Metacomentário	Partes do texto em que o autor faz comentários sobre a estrutura textual.	Comentários sobre a organização do texto, acerca da sequência de ideias.

Fonte: Elaboração própria, baseado em Dos Santos, e Mortimer (2019).

IV. Metodologia

As seções que serão analisadas definem a função de onda nas três obras, e foram divididas para a análise em duas partes; a primeira parte contém as seções mais conceituais, em que os autores definem conceitualmente a função de onda, e a segunda parte, as seções mais “matematizadas”, em que os autores apresentam a equação de Schroedinger. Na primeira parte,

apresentamos três seções intituladas: O significado da função de Onda, do livro *Lições de Física*, de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964); Introdução, do livro *Física Quântica*, de Eisberg e Resnick (1974) e; A Interpretação Estatística, do livro *Mecânica Quântica*, de David Griffiths (1994). Na segunda parte, apresentamos outras três seções: A Equação de Schroedinger, do livro *Lições de Física*, de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964); Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger, do livro *Física Quântica*, de Eisberg e Resnick (1974) e; A Equação de Schroedinger, do livro *Mecânica Quântica*, de David Griffiths (1994).

Para a delimitação dos livros que foram utilizados neste trabalho, foi realizado um levantamento de bibliografias (básica e complementar) apresentadas em ementas disponibilizadas *online*, nos *sites* de seis Universidades do país. Foram usadas, no levantamento, ementas de dezenove disciplinas ofertadas em seis cursos de graduação de física do país (licenciatura e bacharelado). São eles: UFG, UFMG, UNB, URGs, USP e UNICAMP. Os livros analisados constituem as edições traduzidas de obras publicadas em inglês, em anos anteriores, de acordo com a tabela 2, a seguir. No texto deste artigo, optou-se por acompanhar o nome dos autores da data da primeira edição, por uma questão de ordenamento histórico.

Tabela 2: Datas das edições dos livros analisados e datas da obra consultada.

Livro	Ano primeira edição	Ano obra consultada
<i>Lições de Física de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands</i>	1964	2008
<i>Física Quântica de Eisberg e Resnick</i>	1974	1979
<i>Mecânica Quântica de David Griffiths</i>	1994	2011

Para a elaboração dos gráficos, usamos os níveis da DS, retirados do dispositivo de tradução, construído para o conhecimento físico. Analisamos cada período, de ponto final ao próximo ponto final, atribuindo um nível semântico a cada período. Isso permitiu que traçássemos perfis semânticos dessas seções que analisamos, usando os níveis semânticos no eixo y e os períodos no eixo x. Na determinação dos perfis semânticos, pode-se obter, tanto as ondas semânticas, nas quais há variação dos níveis semânticos de densidade, quanto linhas planas, nas quais não há essa variação. A importância da ocorrência de ondas semânticas se traduz na existência de um conjunto de evidências de que a sua produção tem impacto positivo na aprendizagem dos alunos (Macnaught *et al.*, 2013; Maton, 2013, 2014). Juntamente com esses gráficos, são apresentadas tabelas (tabelas 3 a 9) que mostram a porcentagem de cada um dos níveis de densidades, acompanhada da porcentagem de conceitos quânticos ou clássicos utilizados no texto.

V. Os livros de mecânica quântica

As seções analisadas, neste trabalho, foram retiradas dos três livros de mecânica quântica para o ensino superior, mais utilizados por algumas das principais universidades do país, conforme o levantamento feito com as ementas de alguns cursos de física no país, já descrito anteriormente.

Essas obras se apresentam, também, em um contexto histórico, o contexto da Guerra Fria, que sucedeu a Segunda Guerra Mundial. Os departamentos de física americanos tiveram, nessa época, um aumento vertiginoso no número de estudantes. O principal objetivo da física, nesse momento, era treinar físicos quânticos de forma mais rápida e eficiente possível, abandonando reflexões conceituais e interpretativas que ocupavam o tempo das aulas; os alunos deveriam ser mais como engenheiros ou mecânicos quânticos, com domínio dos cálculos da física quântica (Greca; Freire Júnior, 2011). Assim, os aspectos filosóficos da mecânica quântica foram deixados de lado. Após esse momento do treinamento dos físicos quânticos, e com o declínio do número de estudantes de física nas Universidades americanas, há uma tentativa de modificação dos livros com a inclusão de aspectos conceituais da mecânica quântica. Esse é o caso, por exemplo, do livro do Eisberg e Resnick (1974), que apresenta uma lista com algumas questões de discussão conceitual, além da extensa lista de exercícios tradicionais de Mecânica Quântica, caracterizados pela forte ênfase em resoluções matemáticas, e pela pouca ou nenhuma exploração dos conceitos físicos envolvidos. Há que se notar que, mesmo sendo uma tentativa de mudança, esse procedimento ainda não leva os autores a formularem questões conceituais e filosóficas sobre interpretações e fundamentos da mecânica quântica.

O livro de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964) é fruto de parte de um período de dois anos de aulas dadas no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech). Richard Feynmann escreve um prefácio à coleção, apresentando a obra e indicando que o principal objetivo das conferências do Caltech era manter o entusiasmo dos bons alunos, trazendo ideias novas e modernas. Feynmann pontua que “não via o menor motivo para organizar as conferências dentro de uma ordem definida, no sentido de não poder mencionar determinado tópico até que estivesse pronto para discuti-lo em detalhe” (Feynman; Leighton; Sands, 2008). Ou seja, a obra apresenta uma ordem de organização diferente dos livros tradicionais. O volume III da coleção, que é o volume dedicado à mecânica quântica, tem uma apresentação escrita por Matthew Sands, com comentários sobre como a mecânica quântica será abordada no livro, e sobre como foi a escolha dos autores em relação à função de onda.

Essas aulas são uma tentativa de apresentar a eles as ideias básicas e essenciais da mecânica quântica de uma forma que esperamos que seja compreensível. O enfoque que você encontrará aqui é novo, particularmente no nível de um curso para estudantes em estágio intermediário e foi considerado um experimento didático. Após verificar quão fácil alguns estudantes o acolheram eu acredito que a experiência foi um sucesso (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 7).

Os conceitos de física quântica foram apresentados sempre que foram necessários para a compreensão dos fenômenos que estavam sendo descritos. Ademais, as últimas doze aulas eram dadas com uma introdução mais coerente dos conceitos da mecânica quântica. Entretanto, tornou-se claro, à medida que as aulas avançavam para a conclusão, que o tempo dedicado à mecânica quântica não tinha sido suficiente. À medida que o material era preparado, se descobria continuamente que outros tópicos interessantes e importantes podiam ser tratados com as ferramentas que tinham sido desenvolvidas. Existia também o temor que o tratamento excessivamente breve da função de onda de Schrödinger que fora incluído na décima segunda aula não fosse suficiente para proporcionar uma ponte entre os tratamentos mais convencionais de muitos livros que os estudantes leriam. (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 7).

O livro de David Griffiths (1994) é a mais recente das três obras, um texto que apresenta equações e descrições predominantemente matemáticas, e que defende a resolução de problemas como uma forma de compreender a mecânica quântica. Nesse texto, o aluno deve adquirir uma *expertise* em resolver problemas de quântica (Mohan, 2020). No prefácio do livro, o autor defende que o objetivo principal da obra é ensinar a fazer mecânica quântica pela via matemática, e que as questões filosóficas ficarão guardadas para o final do livro.

Não acredito que seja possível discutir de forma inteligente o que significa a mecânica quântica até que se tenha uma noção firme do que a mecânica quântica faz. É, portanto, essencial desenvolver técnicas especiais para atacar problemas mais realistas. Talvez não, mas a física é como a carpintaria: usar a ferramenta certa torna o trabalho mais fácil, e não mais difícil, e ensinar mecânica quântica sem o equipamento matemático apropriado é como pedir ao aluno para cavar uma fundação com uma chave de fenda (Griffiths, 2011, p. 8).

VI. Análise e resultados

As três primeiras seções correspondem à apresentação da função de onda de forma mais conceitual, sem utilização da matemática, nas três obras. Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964) apresentam a função de onda, em uma seção denominada O significado da função de Onda, somente, no último capítulo do terceiro volume da sua coleção, que é todo sobre mecânica quântica. Apresentar a função de onda, no último capítulo do volume sobre mecânica quântica, indica que Feynmann, Leighton e Sands (1964) seguem uma abordagem própria na sua obra, que não é histórica, e com uma ordem na qual os conceitos são apresentados de maneira diferente das abordagens tradicionais (Hoernig; Massoni; Lima, 2020; Karam, 2018). Eisberg e Resnick (1974) apresentam a função de onda em uma seção chamada Introdução, que introduz o quinto capítulo da sua obra, sendo que os quatro capítulos anteriores abordam a chamada “velha mecânica quântica”, com temas como: a radiação térmica e o postulado de Planck, fótons, postulado de Broglie e modelo de Bohr. David Griffiths (1994) apresenta a função de onda em uma seção denominada A Interpretação Estatística, que é a

segunda seção do primeiro capítulo do seu livro. O autor escolhe apresentar, primeiramente, a função de onda na forma matemática, e só, posteriormente, apresentá-la na forma conceitual.

Seção do livro “Lições de Física” de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964): “O significado da função de Onda”

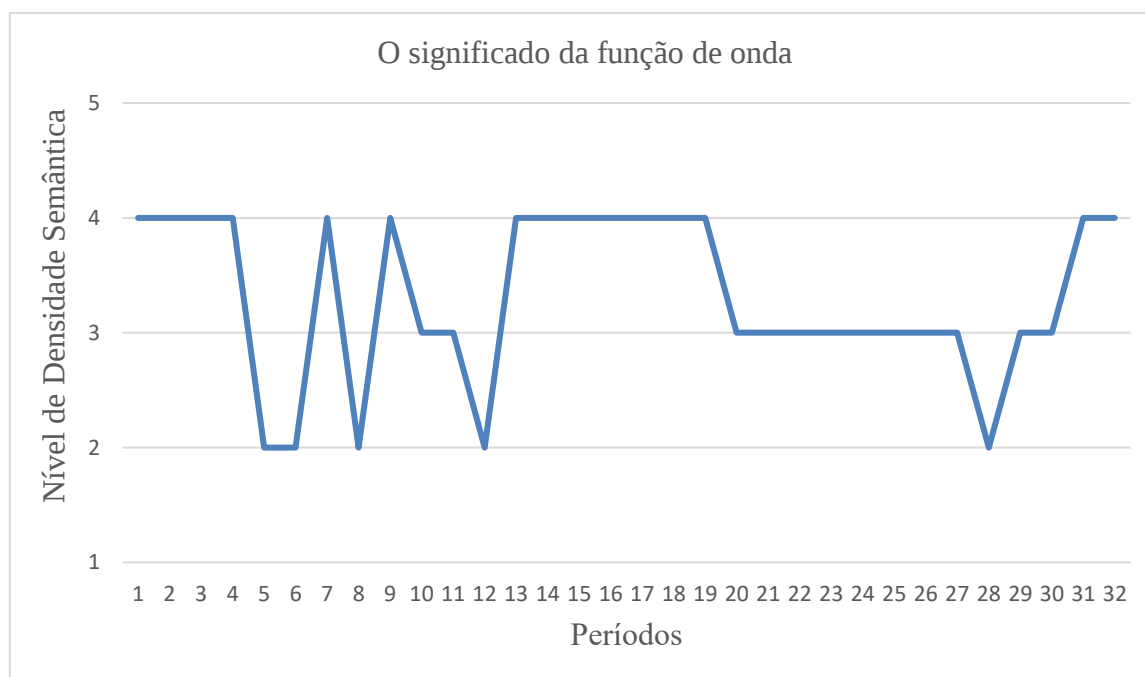


Gráfico 1 – Análise da densidade semântica (DS) O significado da função de Onda.

Tabela 3: Distribuição da forma na seção *O significado da função de Onda*.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/ Quântico	
5	Simbólica	0%		
4	Teórica	47%	C 0%	Q 100%
3	Conceitual	37%	C 0%	Q 100%
2	Narrativa	16%		
1	Metacommentário	0%		

A análise do discurso em relação ao perfil semântico, de acordo com as variações de DS, e a identificação de ondas semânticas, ao longo do gráfico 1, mostra que, na porção inicial, há presença de ondas semânticas com alternância de densidade entre os níveis Teórico (4) e os nível Narrativo (2), sugerindo movimentos de empacotamento e reempacotamento do significado. De acordo com Macnaught *et al.* (2013), esses movimentos dizem respeito às variações de DS, ao longo do discurso: o desempacotamento corresponde ao processo de

descondensação do significado, no qual conceitos abstratos e altamente complexos são traduzidos em formas mais simples, enquanto o reempacotamento refere-se ao movimento inverso, isto é, à recondensação do significado, em que essas explicações são novamente articuladas em termos mais abstratos e conceitualmente densos. A construção das ondas semânticas depende justamente da articulação entre esses dois movimentos, permitindo a transição entre diferentes níveis de densidade e de complexidade, o que favorece a construção do conhecimento. Na sequência do gráfico, observam-se dois patamares de DS (período de 12 a 19 e período de 20 a 27) com a presença de uma linha plana estabelecida no nível 4 (teórico), e outra estabelecida no nível 3 (conceitual), indicando momentos de menor variação e, portanto, de estabilização do discurso em determinados níveis semânticos.

Na seção analisada, os autores Feynmann, Leighton e Sands (1964) utilizam três níveis de DS, o 4, 3 e 2, com prevalência do nível 4 (Teórico) e 3 (Conceitual). Os autores não utilizam o nível 5, simbólico, para apresentar o significado da função de onda. Os autores optam por discutir o significado da função de onda, sem utilizar nenhuma equação matemática, e utilizam-se, para isso, predominantemente, dos níveis Teórico e Conceitual. No nível 4 (Teórico), os autores utilizam-se de teorias físicas, como, por exemplo, a interpretação de Born da equação de Schroedinger, que trouxe para a mecânica quântica a questão das probabilidades e incertezas na localização das partículas, como no trecho a seguir:

Foi Born que interpretou corretamente (até onde sabemos) o ψ da equação de Schrödinger em termos da amplitude de probabilidade – essa difícil ideia de que o quadrado da amplitude não é a densidade de carga mas simplesmente a probabilidade por unidade de volume de encontrar um elétron lá, e que quando você encontra o elétron em algum lugar toda a carga está lá. (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 21-6).

O nível 3, Conceitual, requer a compreensão de conceitos físicos mais simples do que as teorias apresentadas do nível 4, e aparecem, nesta seção, em trechos em que os autores tratam de conceitos como densidade de carga, corrente elétrica e estado para dar significado à função de onda.

Por outro lado, pense em uma situação em que existe um número enorme de partículas com exatamente o mesmo estado, um número muito grande delas com a mesma função de onda (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 21-6).

Então na situação em que podemos ter muitas partículas exatamente no mesmo estado, é possível uma nova interpretação física da função de onda. A densidade de carga e a corrente elétrica podem ser calculadas diretamente a partir das funções de onda e as funções de onda tomam um significado físico que se estende para situações clássicas, macroscópicas (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 21-6)

O nível 2, Narrativo, aparece, nesta seção, quando os autores narram os problemas enfrentados na descoberta da função de onda.

Ele logo descobriu resolvendo uma série de problemas que isso não estava funcionando direito. Foi nesse ponto que Born fez uma contribuição essencial às nossas idéias com relação à mecânica (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 21-6).

Karam (2018), em trabalho denominado “O que diferencia as Feynman Lectures de livros tradicionais?”, aponta que a presença de excesso de texto, nessa coleção, se justifica por serem transcrições diretas das aulas, e por priorizarem a abordagem conceitual. Outra característica apontada, nesta pesquisa, (Karam, 2018) é que os livros da coleção “Lições de Física” discutem, em seu texto, aspectos epistemológicos da física.

Os autores utilizam somente conceitos quânticos na seção em que dão significado à função de onda. A utilização de apenas física quântica é uma opção dos autores do livro, que afirmam que irão descrever a mecânica quântica de uma maneira quântica, não tentam encontrar conexões com a mecânica clássica, e, portanto, falarão sobre algo novo em um novo “idioma” (Feynman; Leighton; Sands, 2008). Segundo Karam (2018), o discurso didático do livro de Feynmann é extremamente metacognitivo e filosófico, muito diferente dos livros tradicionais, pois há discussão de epistemologia em praticamente todos os capítulos, e isso é feito de maneira estreitamente ligada ao conhecimento específico que está sendo trabalhado, o que torna a discussão muito mais rica.

Importante destacar que, nos níveis 2, Narrativo, e, no nível 1, Metacommentário, não foi feita a distinção entre física quântica e clássica, já que, nesses níveis, não está sendo utilizada a física para definir a função de onda. Não faz sentido, nesses níveis, mostrar porcentagem entre clássico e quântico, já que o nível Narrativo relaciona fatos narrados na linguagem comum e o nível Metacommentário diz respeito a considerações dos autores sobre estrutura textual, não importando o conteúdo físico associado.

Seção do livro Física Quântica de Eisberg e Resnick (1974): “Introdução”

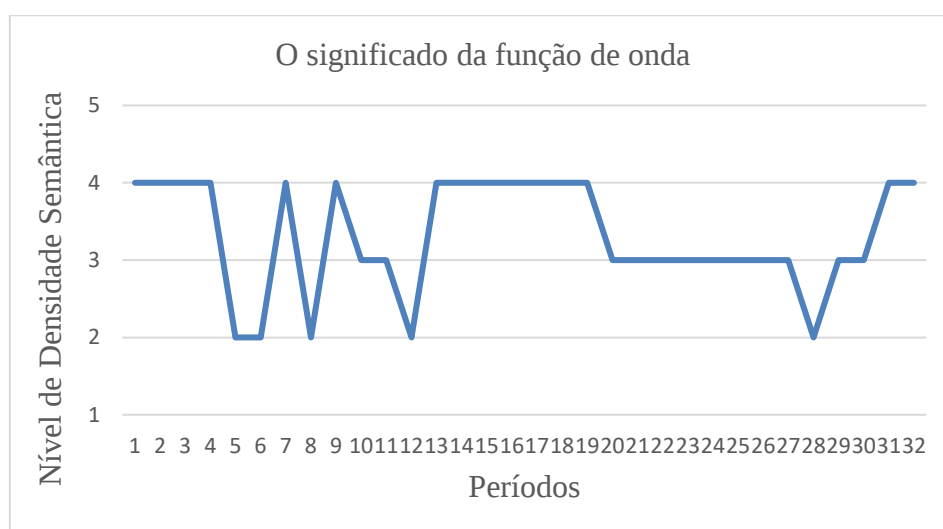


Gráfico 2- Análise da densidade semântica (DS) O significado da função de Onda.

Tabela 4: Distribuição da forma na seção *Introdução*.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/ Quântico	
5	Simbólica	21%	C 84%	Q 16%
4	Teórica	27%	C 88%	Q 12%
3	Conceitual	17%	C 20%	Q 80%
2	Narrativa	3%		
1	Metacomentário	31%		

No perfil semântico, apresentado no Gráfico 2, temos a presença de muitas ondas semânticas, evidenciadas por oscilações entre o nível 1 (metacomentário) e os níveis mais elevados, 4 (teórico) e 5 (simbólico). Esses movimentos expressam a alternância entre processos de desempacotamento nos quais os significados são descondensados e tornados mais acessíveis, e de reempacotamento em que o conhecimento é recondensado em formas mais abstratas e conceitualmente densas. No caso desse gráfico, observa-se uma alta amplitude semântica, com variações que se estendem do nível 1 ao nível 5. O gráfico também conta com a presença de linhas planas curtas, distribuídas ao longo dos diferentes níveis de DS. Esses segmentos indicam momentos em que o discurso permanece estabilizado em um mesmo nível de significado, sem realizar deslocamentos na escala semântica. As linhas planas observadas são de curta duração, e, embora ocorram em todos os níveis de DS, não se prolongam o suficiente para comprometer a dinâmica das oscilações do perfil.

Os autores Eisberg e Resnick (1974) utilizam os cinco níveis de DS com predomínio dos níveis 1 (Meta-comentário), 4 (Teórico) e 5 (Simbólico). Essa seção, por ser introdutória ao capítulo chamado A Teoria de Schrodinger da Mecânica Quântica, apresenta o predomínio de metacomentários, o que caracteriza o nível 1. O autor faz diversos metacomentários, ao falar sobre suas intenções com o livro e sobre como suas ideias serão apresentadas na obra, apontando o que trará ao estudante, nas seções seguintes, e indicando o que este precisa saber para seguir a leitura.

Evidentemente, o estudante, bastante provavelmente, já tem alguma experiência com equações diferenciais ordinárias relacionada a seu estudo da mecânica clássica; Vamos desenvolver os pontos essenciais da teoria de Schrodinger e utilizá-los para tratar uma série de importantes sistemas microscópicos (Eisberg; Resnick, 1979, p.172).

Esse livro de Eisberg e Resnick, de 1974, foi uma tentativa de incluir alguma discussão conceitual no ensino da mecânica quântica, e foi publicado como uma sugestão do editor, a partir de experiências bem-sucedidas dos mesmos autores em outras publicações de física. Eisberg e Resnick (1974) elaboraram um rascunho do livro e fizeram testes em sala e com colegas de departamento, o que reflete na estruturação do livro (Fantin, 2024). Há inúmeros problemas do tipo qualitativos (sem envolvimento de questões matemáticas), semelhantes a

livros didáticos de física de outras temáticas, composto de questões para discussão, com perguntas do tipo: “*Considere uma onda de água se propagando na superfície do oceano. Se ninguém estivesse observando a onda, ou mesmo pensando nela, você diria que essa onda existe. Você daria a mesma resposta para uma onda da mecânica quântica? Se não, por quê?*”

Os autores utilizam, no nível Simbólico, a equação do movimento ondulatório clássico para introduzir a função de onda da mecânica quântica, e se apoiam na mecânica ondulatória clássica para a introdução da Equação de Schroedinger. Por isso a predominância da física clássica nos níveis 5 e 4 de DS. No nível 3, o conceitual, há uma inversão entre a utilização da física quântica e clássica, com o predomínio de conceitos quânticos no texto. Apesar de esse nível 3 ter menor predominância no texto, os autores se referem ao postulado de Broglie como um passo fundamental no desenvolvimento da teoria de Schroedinger.

Seção do livro *Mecânica Quântica* de David Griffiths (1994): “A Interpretação Estatística”

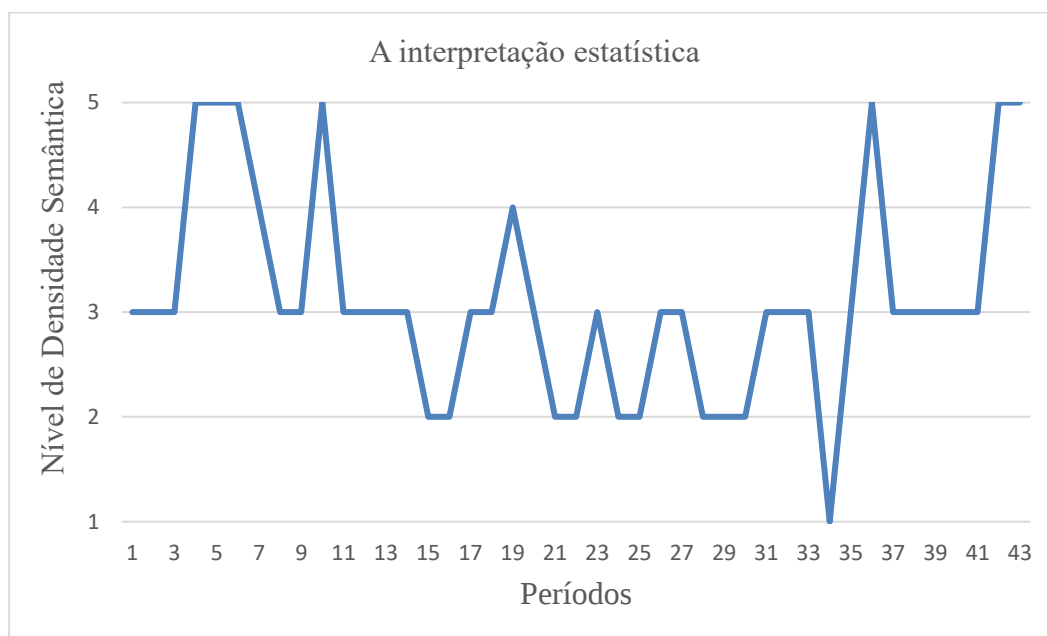


Gráfico 3: Análise da densidade semântica (DS) na seção A Interpretação Estatística.

Tabela 5: Distribuição da forma na seção A Interpretação Estatística.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/ Quântico	
5	Simbólica	16%	C 0%	Q100%
4	Teórica	7%	C 0%	Q100%
3	Conceitual	55%	C 0%	Q100%
2	Narrativa	20%		
1	Metacommentário	2%		

O perfil semântico apresentado no Gráfico 3 é caracterizado pela presença de ondas semânticas ao longo de toda a sequência, com variações na amplitude dessas ondas. Inicialmente, observam-se oscilações entre os níveis conceitual (3) e simbólico (5). Na porção intermediária do gráfico, há a formação de ondas de menor amplitude, com variações entre os níveis conceitual (3) e narrativo (2), o que sugere movimentos mais limitados de desempacotamento e reempacotamento, já que são níveis próximos um do outro. Essa onda semântica, caracterizada entre os níveis narrativo (2) e o conceitual (3), é um movimento que o autor utiliza de explicação de conceitos quânticos, e, logo, recorre a recursos narrativos como a interpretação da teoria, tornando o conhecimento menos complexo ao leitor. Na parte final do gráfico, há uma onda de maior amplitude, com variação entre os níveis 1 (Metacomentário) e 5 (Simbólico), além de uma outra onda com variação entre o nível 3 (Conceitual) e 5 (Simbólico). A variação, na amplitude das ondas, é um aspecto importante; ondas de menor amplitude tendem a mobilizar menos o conhecimento, ao permanecerem em níveis próximos de complexidade e abstração, enquanto ondas de maior amplitude ampliam esse potencial, ao conectarem níveis mais distantes, articulando entre formas mais simples e mais complexas de conhecimento. O gráfico também apresenta linhas planas curtas nos níveis narrativo (2) e conceitual (3), que são os níveis que predominam na seção.

A seção denominada *Interpretação Estatística*, a predominância é do nível 3 da DS, o Conceitual. David Griffiths (1994), opta por utilizar conceitos de quântica como o de medida, interpretação estatística, probabilidade, estado e as posições realista, ortodoxa e agnóstica para responder à pergunta inicial da seção: *o que é exatamente essa 'função de onda' e o que ela faz por você quando obtida?* A seção também apresenta a utilização do nível 5 (Simbólico), pois traz dois gráficos, um para ilustrar a probabilidade de encontrar a partícula entre dois pontos, ilustrado pela área de um gráfico de função de onda típica, e outro para ilustrar o colapso da função de onda. O nível 2, Narrativo, apresenta períodos que auxiliam o leitor a distinguir as principais escolas de pensamento relacionadas à indeterminação quântica em relação à medição da posição da partícula (função de onda), como exemplificado a seguir.

Foi o ato de medir que forçou a partícula a “tomar uma decisão” (mas não ousaremos perguntar como e por que ela se decidiu pelo ponto C). Jordan afirmou mais contundentemente: “As observações não somente perturbam o que está para ser medido, mas produzem o que está para ser medido... Forçamos (a partícula) a assumir uma posição definida” (Griffiths, 1994, p. 3).

Entre os físicos essa sempre foi a posição mais amplamente aceita. Note, entretanto, que se ela é correta há algo de muito peculiar no ato de medir algo que mais de meio século de discussões pouco esclareceu (Griffiths, 1994, p. 3).

A seção não utiliza conceitos clássicos para interpretar, estatisticamente, a função de onda em nenhum nível de DS utilizado. Segundo a pesquisa de (Dubson *et al.*, 2009), o texto de Griffiths (1994) é o mais utilizado em Universidades americanas: 65% das escolas usam

Griffiths (1994) e 63% dos professores entrevistados usam ou planejam usar o livro do Griffiths (1994). Apesar da popularidade desse texto, a pesquisa relata que os professores que usam essa obra raramente o seguem de perto e confiam fortemente em suas próprias anotações.

A segunda parte da análise corresponde às três seções que apresentam a função de onda, na sua forma matemática, em que os autores apresentam a função de onda na forma da Equação de Schroedinger. Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964) apresentam a parte matemática da Equação de Schroedinger em uma seção chamada *A Equação de Schroedinger*. Esta seção é apresentada, no livro, em um capítulo que antecede, em cinco capítulos, a seção já analisada chamada de *O significado da função de Onda*. Eisberg e Resnick (1974) apresentam a seção *Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger* no quinto capítulo do seu livro (o primeiro sobre a nova mecânica quântica), logo após apresentar a seção teórica sobre a função de onda analisada anteriormente. David Griffiths (1994) tem a primeira seção do seu livro chamada de *A Equação de Schroedinger*, em que traz a apresentação matemática da função de onda.

Seção do livro Lições de Física de Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964): “A Equação de Schroedinger”

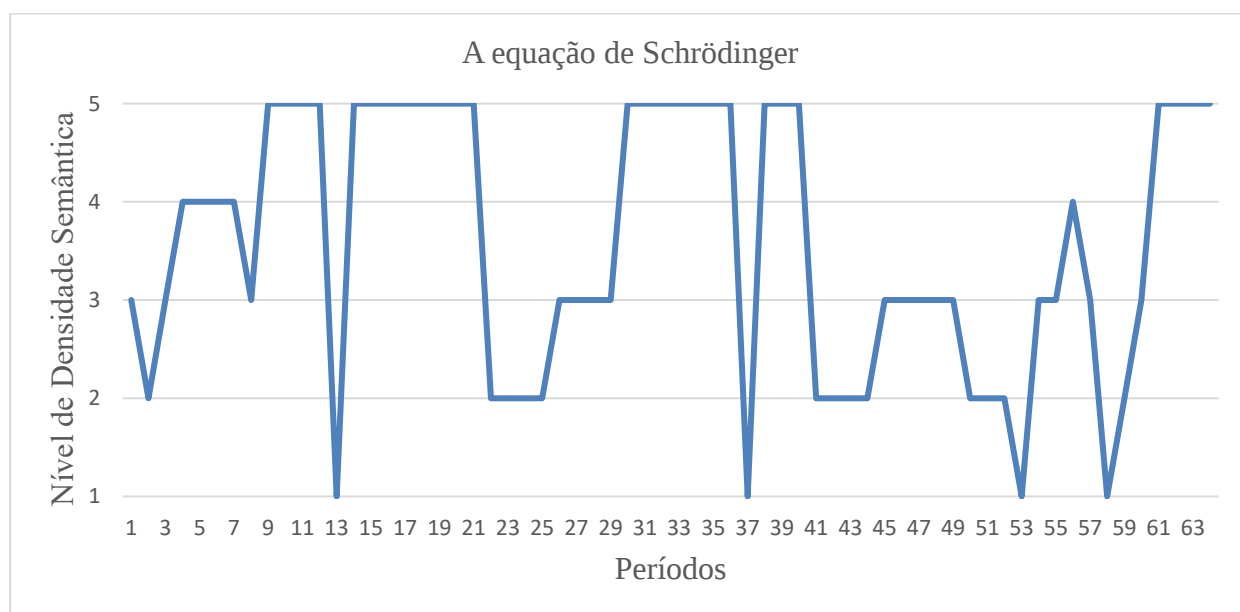


Gráfico 4 - Análise da densidade semântica (DS) A Equação de Schroedinger.

Tabela 6: Distribuição da forma na seção A Equação de Schroedinger.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/ Quântico	
5	Simbólica	41%	C 12%	Q 88%
4	Teórica	8%	C 0%	Q 100%
3	Conceitual	25%	C 44%	Q 66%
2	Narrativa	20%		
1	Metacommentário	6%		

O Gráfico 4 apresenta um perfil semântico caracterizado pela presença de ondas semânticas ao longo de toda a sequência. Destacam-se, especialmente, as transições de maior amplitude, mais recorrentes entre os níveis 1 (metacommentário) e 5 (simbólico), revelando forte variação na complexidade e abstração do conhecimento, e configurando ondas de alta amplitude. Observam-se, também, transições de menor amplitude, como entre os níveis 3 (conceitual) e 2 (narrativo), que correspondem a oscilações mais locais entre níveis próximos. Essas variações na DS são fundamentais para a construção de perfis semânticos que permitem a articulação entre diferentes níveis semânticos, favorecendo a construção cumulativa do conhecimento (Maton, 2013). Observam-se, ainda, linhas planas curtas, com predomínio no nível mais elevado, o simbólico (5), o que sugere momentos de estabilização do discurso, nesse nível de DS, associados ao uso intensivo de equações matemáticas e gráficos.

A seção *A Equação de Schroedinger* aparece no livro de Feynmann, Leighton e Sands (1964), no décimo sexto capítulo de um total de vinte e um, e é anterior à seção em que os autores definem conceitualmente a função de onda. Nessa seção há um predomínio do nível 5, Simbólico, com a utilização de uma notação própria da mecânica quântica, a notação de Dirac, só usada nessa seção entre todas analisadas na pesquisa.

Para a apresentação da função de onda, como é proposta da seção, Feynmann, Leighton e Sands (1964) utilizam da quase totalidade da mecânica quântica. É importante pontuar que essa seção difere pouco dos livros tradicionais de mecânica quântica, com grandes quantidades de formalismo matemático e pouca reflexão conceitual. Não há, nessa seção, o que (Karam, 2018) aponta, na sua pesquisa, que é considerada uma característica da obra das Lições da Física (1964): reflexões do autor sobre a natureza do conhecimento físico e sobre os desafios inerentes à aprendizagem do aluno(a)/leitor(a).

O nível 3, Conceitual, é o segundo nível mais utilizado nessa seção, para apresentar a função de onda e, nesse nível, há utilização de conceitos clássicos como níveis de energia, excitação eletrônica, função potencial e ligação química. O nível 2, o Narrativo, aparece, também, no texto, quando os autores trazem um pouco do histórico da elaboração de Schroedinger da equação da função de onda.

Ela saiu da mente de Schrödinger, inventada na sua luta para encontrar uma compreensão das observações experimentais do mundo real. Foi escrita por Schrödinger antes de qualquer uma das outras equações quânticas que descrevemos neste livro terem sido descobertas (Feynman; Leighton; Sands, 2008, p. 16-13).

Seção do livro Física Quântica de Eisberg e Resnick (1974): “Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger”

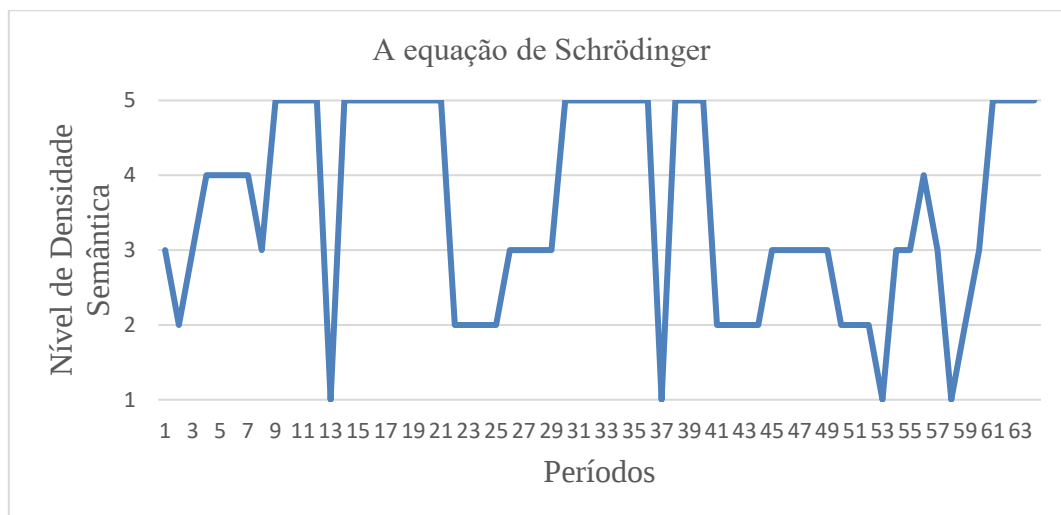


Gráfico 5: Análise da densidade semântica (DS) da seção *Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger*.

Tabela 7: Distribuição da forma na seção *Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger*.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/Quântico	
5	Simbólica	65%	C 85%	Q 17%
4	Teórica	7%	C 33%	Q 66%
3	Conceitual	9%	C 62%	Q 38%
2	Narrativa	15%		
1	Metacommentário	4%		

A análise do perfil semântico, correspondente ao Gráfico 5, evidencia que, tanto no início quanto no final da sequência, há variações nos níveis de DS, configurando a formação discreta de ondas semânticas. No trecho inicial, essas ondas apresentam amplitude média, com oscilações predominantes entre o nível 3 (conceitual) e o nível 5, correspondendo à introdução da seção em que se desenvolverão argumentos matemáticos para explicar como se obteve a Equação de Schroedinger. No final do gráfico, há a presença de ondas de menor amplitude, concentradas em níveis mais baixos de DS, especialmente, entre os níveis 2 (narrativo) e 3 (conceitual) e 2 (narrativo) e 1 (Metacommentário), o que pode ser justificado pela narração de

um fato histórico, na qual o físico Debye descreve as circunstâncias que envolveram o desenvolvimento da equação de Schrödinger. O gráfico 5 tem, na sua maior parte, uma longa linha plana no nível mais alto, o simbólico (5), indicando forte condensação do significado, associada ao uso contínuo de formalismo matemático e representação simbólica, já que, na seção, os autores utilizam argumentos matemáticos para se chegar à Equação de Schroedinger. Os perfis com predominância de alta DS, sem variações frequentes, tendem a dificultar o acesso ao conhecimento, uma vez que restringem os movimentos de desempacotamento necessários para tornar os significados mais acessíveis (Macnaught *et al.*, 2013).

Eisberg e Resnick (1974) apresentam quatro argumentos para se chegar à Equação de Schroedinger, e todos eles são matemáticos, o que justifica a presença de 65% no nível de densidade 5 (simbólico) nessa seção. Os autores utilizam-se, predominantemente, da física clássica, no nível simbólico, para chegar à Equação de Schroedinger. Nessa seção, existe uma fala dos autores de que Schroedinger chegou na equação com argumentos diferentes do que os autores usarão no texto e mais esotéricos. É transcrita uma citação na qual o físico Debye descreve as circunstâncias que cercaram o desenvolvimento da equação de Schroedinger, o que justifica a presença de 15% do nível 2 (narrativo) de DS. Cordeiro e Peduzzi (2013) trazem, em uma pesquisa sobre descontextualizações no livro didático de Eisberg e Resnick (1974), uma observação de que o tratamento da história da ciência, de maneira a ilustrar o conhecimento científico, como é feito nessa seção, não configura o que se almeja por contextualização histórica. É importante se atentar para a qualidade da história da ciência, que está presente nos livros, principalmente, porque esses são estudados por futuros professores que irão propagar esses conteúdos em sala de aula. Esses autores afirmam que há, no texto de Eisberg e Resnick (1974), a afirmação de uma imagem individualista da ciência, com menção a grandes nomes como, nesse caso, o de Schroedinger, contribuindo com a ideia de que apenas mentes privilegiadas são capazes de fazer ciência, não valorizando os coadjuvantes de uma teoria científica, que também são essenciais para a construção do conhecimento.

Seção do livro Mecânica Quântica de David Griffiths (1994): A Equação de Schroedinger

Tabela 8: Distribuição da forma na seção *A Equação de Schroedinger*.

Nível	Forma	Porcentagem	Clássico/ Quântico	
5	Simbólico	67%	C 63%	Q 37%
4	Teórica	8%	C 0%	Q 100%
3	Conceitual	25%	C 100%	Q 0%
2	Narrativa	0%		
1	Metacomentário	0%		

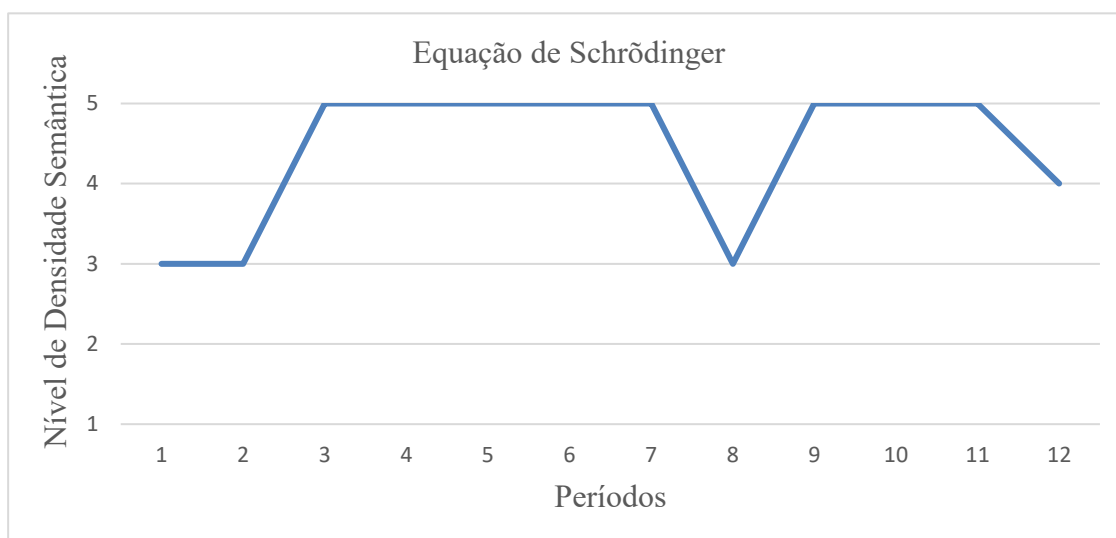


Gráfico 6: Análise da densidade semântica (DS) na seção A Equação de Schroedinger.

O gráfico 6 apresenta um perfil semântico caracterizado por baixa variação na DS, com predominância de níveis elevados, especialmente, o nível 5 (simbólico), intercalado por poucas transições para o nível 3 (conceitual). Se observa a formação de uma única onda semântica. Verifica-se a presença de dois patamares no nível mais alto, o simbólico (5), o que indica uma forte concentração em formas de conhecimento altamente complexas, associadas ao uso intensivo de representações simbólicas, como as equações matemáticas.

David Griffiths (1994) utiliza, na primeira seção do seu livro, chamada *A equação de Schroedinger*, apenas três níveis de DS (5, 4 e 3), e tem 67 % da utilização do nível 5 (simbólico). O autor introduz a seção trazendo um problema clássico a ser resolvido, que é encontrar a posição de uma partícula (o que justifica a utilização de 100% de física clássica no nível 3, Conceitual, da DS). Ele faz uma comparação dessa questão com a mecânica quântica, que, segundo ele, aborda esse mesmo problema de um modo diferente, buscando a função de onda da partícula.

As seções que apresentam a equação matemática da função de onda, chamada, neste trabalho, de mais “matematizadas”, apresentam o nível mais alto de DS, o simbólico, como predominante em todos os textos, sendo que, nos textos de Eisberg e Resnick (1974) e Griffiths (1994), o predomínio é de mais de 60%. A seção do livro de Feynmann, Leighton e Sands (1964), que apresenta a forma matemática da equação da função de onda, tem 41% do texto com o nível 5, simbólico, e os outros níveis 3 (conceitual) e 2 (narrativo) somam 45 %. Os autores conseguiram uma distribuição entre os outros níveis (3 e 2), indicando que, mesmo em uma seção de apresentação de uma equação, é possível apresentar a função matemática com níveis de DS mais baixos.

VII. Discussão e Considerações Finais

A pesquisa apresentou a análise da DS em seis seções de três livros de mecânica quântica, todas contendo a definição da função de onda, com a intenção de aprofundar sobre o conhecimento disponibilizado em materiais didáticos de mecânica quântica para o ensino superior. As seções do livro de Feynmann, Leighton e Sands (1964) apresentam predomínio da utilização da física quântica, enquanto Eisberg e Resnick (1974) definem a função de onda, utilizando-se, predominantemente, da física clássica. Griffiths (1994) alterna entre essas abordagens, utilizando, em uma seção, somente a física quântica, e, em outra, predominantemente, a física clássica. Essa opção metodológica, especialmente, ao introduzir a Equação de Schroedinger, a partir de um problema clássico, evidencia uma estratégia que permanece em debate na área de ensino de física. Nessa área, não há consenso sobre, se o ensino de mecânica quântica deve ou não se iniciar a partir de conceitos da física clássica (Gil; Solbes, 1993; Greca; Freire Júnior, 2003; Ireson, 2000; Sinarcas; Solbes, 2013). Isso se deve a uma das dificuldades relacionadas à aprendizagem da quântica, que é a estrutura conceitual que contraria a intuição advinda da experiência diária (Greca; Herscovitz, 2011; Greca; Moreira; Herscovitz, 2001; Ke; Monk; Duschl, 2005; Levrini; Fantini, 2013; Lin; Singh, 2010; Müller; Wiesner, 2002; Olsen, 2002; Pospiech, 2003; Singh; Marshman, 2015). Apoiar-se em conceitos da Física Clássica para o ensino da Mecânica Quântica pode contribuir para que os estudantes recorram a interpretações clássicas, ao analisar fenômenos quânticos, constituindo um possível obstáculo à compreensão das especificidades da Mecânica Quântica.

Ao que se refere à organização do conhecimento, a análise dos gráficos permitiu traçar os perfis semânticos das seções, evidenciando não apenas o grau de complexidade do conhecimento, mas, sobretudo, a maneira como esse conhecimento é organizado e mobilizado ao longo do discurso. Observou-se que esses perfis variam significativamente entre as obras analisadas, especialmente, no que se refere à presença ou não de ondas semânticas, à sua regularidade e amplitude. Em algumas seções, como “Introdução” do livro Física Quântica de Eisberg e Resnick (1974), “A Interpretação Estatística” de David Griffiths (1994) e “A Equação de Schroedinger” de Feynman, Leighton e Sands (1964), formaram-se ondas semânticas bem definidas, com alternância entre níveis de alta e baixa DS, evidenciando o movimento entre diferentes graus de complexidade conceitual. Em outras seções, como “*Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger*” (Eisberg; Resnick, 1974), as ondas semânticas apareceram, de forma localizada, apenas no início e no final, indicando uma limitação na variação semântica ao longo do texto. Já, na seção “*O Significado da Função de Onda*” (Feynman; Leighton; Sands, 1964), esse movimento foi restrito a trechos pontuais, sem ocorrer, de forma contínua, em toda a exposição. As ondas semânticas formadas nos gráficos refletem o movimento entre diferentes níveis de complexidade, alternando entre alta e baixa DS (Maton, 2014). A amplitude das ondas apresentada nos gráficos constitui um aspecto analiticamente relevante: ondas de maior amplitude, que conectam níveis mais distantes da escala semântica, por exemplo, entre metacomentário (1) e simbólico (5), ampliam o

potencial de articulação entre formas mais simples e mais complexas de conhecimento; por outro lado, ondas de menor amplitude, por exemplo, entre o nível narrativo (2) e o simbólico (3), que são níveis próximos e de menor variação de densidade, limitam a mobilização do conhecimento, ao restringir a variação na complexidade e abstração. Outro elemento evidenciado pelos perfis semânticos é a presença de linhas planas, ocorrendo de forma marcante nas seções em que predominam a utilização no nível simbólico (5). Nessas situações, observa-se a permanência prolongada no nível simbólico (5), indicando elevada utilização de representações matemáticas formais. Os perfis com baixa variação semântica tendem a dificultar o acesso ao conhecimento, uma vez que restringem os movimentos de desempacotamento do conhecimento necessários para tornar os significados mais acessíveis. Esse padrão pode ser observado, por exemplo, na seção “A Equação de Schroedinger”, de David Griffiths (1994), bem como na seção “Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger”, do livro *Física Quântica*, de Eisberg e Resnick (1974), nas quais a ênfase em representações matemáticas contribui para a redução da variação semântica ao longo da exposição. De acordo com Maton (2014), a presença de ondas semânticas evidencia o movimento entre níveis variados de abstração e complexidade, estruturando o conhecimento de forma que os alunos possam dominar a teoria e aplicá-la em contextos menos complexos. Gráficos que não apresentam ondas semânticas, em contrapartida, mostram patamares sem variações de densidade, sugerindo que o conhecimento está isolado em níveis altamente complexos (alta densidade) ou excessivamente simples (baixa densidade), sem alternância entre ambos. As ondas semânticas são fundamentais para a construção do conhecimento, pois permitem que os alunos transitem entre significados complexos e mais simples, promovendo uma compreensão mais profunda e transferível (Maton, 2013, 2014).

Eisberg e Resnick (1974) apresentam, ao final de cada seção do seu livro, questões com perguntas conceituais, com o intuito de resgatar a problemática conceitual quântica. Porém, a DS mais alta (níveis Simbólico e Teórico) é predominante nas duas seções que apresentam a Equação de Schroedinger. Na seção em que apresentam argumentos plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger, todos eles são matemáticos, e os autores utilizam-se de 65% no nível mais alto de densidade 5, o Simbólico. A seção mais conceitual dessa obra é a única das analisadas em que há presença significativa do nível 1, Metacommentário, já que é uma seção introdutória, e se propõe a orientar o leitor de como será o estudo da função de onda, o que será apresentado posteriormente no livro, e o que ele precisa conhecer para seguir com a leitura. É o livro que mais se utiliza da física clássica para introduzir a função de onda. Apesar disso, somente quando se refere ao postulado de de Broglie como um passo fundamental no desenvolvimento da teoria de Schroedinger, os autores fazem referência à velha mecânica quântica para introduzir a Equação de Schroedinger.

Richard Feynmann, Robert Leighton e Matthew Sands (1964) apresentam seções mais narrativas na análise, o que ocorre porque a obra é resultado de dois anos de conferências no Caltech, ou seja, o livro é, em parte, uma transcrição das conferências, e conta uma história

dessas aulas aos estudantes. A ordem dos conceitos apresentados é diferente dos outros livros, a função de onda é abordada no último capítulo do volume sobre mecânica quântica, e a obra não segue um ordenamento histórico nem tradicional. O significado da função de onda só é destrinchado no último capítulo, apesar de ser utilizado em seções prévias, sem nenhuma explicação mais detalhada. Outra diferença desse livro para os demais é que os autores optam por discutir o significado da função de onda sem utilizar nenhuma equação matemática: este é o único livro que não utiliza nada do nível 5 (Simbólico) para apresentar a função de onda conceitualmente. No entanto, Feynmann, Leighton e Sands (1964) utilizam 100% de conceitos quânticos na seção que dão significado à função de onda.

David Griffiths (1994) tem duas seções em que apresenta equações e descrições predominantemente matemáticas, coerente com o que defende no prefácio do livro, de que a resolução de problemas é uma forma de compreender a mecânica quântica. A seção mais conceitual é apresentada na sua obra, após apresentar seção matematizada da função de onda, e tem predomínio do nível 3, Conceitual. Há, nessa seção conceitual, um enfraquecimento da DS em relação às demais, e a utilização de 100% de conceitos quânticos. A seção em que o autor apresenta a *Equação matemática de Schroedinger propriamente dita* tem 67 % de utilização do nível 5, Simbólico. Outra característica da onda semântica gerada nessa seção, juntamente com a seção *Argumentos Plausíveis para se chegar à Equação de Schroedinger*, do livro de Eisberg e Resnick (1974), é a presença de um patamar extenso, ocupando todo o gráfico construído, mostrando que o texto permanece a maior parte no nível 5, não apresentando variações de DS (prevalência de mais de 60% no nível 5 simbólico). A permanência em um nível de DS alto (alta complexidade de conhecimento), durante parte do texto, não é ideal para a construção do conhecimento. Não há grandes variações de densidade nessas seções, e, conseqüentemente, variações de complexidade do conhecimento, o que pode tornar a leitura e o entendimento do estudante complexa, com a permanência no nível simbólico 5, sem variações.

A pesquisa teve por objetivo aprofundar o entendimento sobre o conhecimento disponibilizado em livros de mecânica de ensino superior relacionado à definição da função de onda. Os livros-texto, na formação acadêmica de estudantes, e na prática pedagógica de professores, merecem destaque, já que esses não só influenciam o que e como os estudantes aprendem, mas também como os professores ensinam. Muitos professores consideram os livros-texto como a única fonte de pesquisa; os livros-textos transformam-se, na prática, em currículo, especialmente, para professores inexperientes (Ogan-Bekiroglu, 2007). A análise revelou que os livros abordam o conceito de função de onda de maneiras distintas, e essa variação influencia diretamente a forma como os conceitos são apresentados e compreendidos pelos estudantes, impactando a efetividade do aprendizado. A análise da DS tem a função de identificar as potencialidades dos materiais de mecânica quântica quanto ao entendimento e aprendizagem dos estudantes.

As seções que apresentaram as ondas semânticas, com maior alternância de DS, permitem que o leitor transite entre significados teóricos mais abstratos e complexos, além de conceitos mais simplificados, aspecto considerado central por Maton (2014), para a construção do conhecimento. Por outro lado, as seções com pouca variação semântica, que permanecem longos trechos em níveis simbólicos, indicam textos excessivamente densos, que podem dificultar a apropriação do conhecimento e restringir a compreensão conceitual.

Consideramos que a pesquisa, nos livros didáticos mais utilizados em mecânica quântica, usando os referenciais da Teoria dos Códigos de Legitimação, em sua dimensão semântica, com ênfase no conceito de densidade semântica, revela importantes facetas desses livros, que têm o potencial de explicar algumas características do ensino de mecânica quântica para os estudantes universitários de Física. Acreditamos que a determinação da outra variável da dimensão semântica, – a gravidade, que se refere ao grau de relação entre significados e seus contextos (Maton, 2014), – é um desdobramento natural desta pesquisa, que será realizado.

Agradecimento

Eduardo Fleury Mortimer agradece ao CNPq, pela bolsa de produtividade em pesquisa.

Referências bibliográficas

BOCHECO, O.; CRUZ, F. F. S.; MACHADO, S. da S. L. Densidade semântica de estruturas físico-matemáticas e a abordagem da matemática no ensino de física. **Revista de Enseñanza de la Física**, v. 34, n. extra, 2022.

BRUNER, J. **Acts of Meaning**. Cambridge: Harvard University Press, 1990.

CHHABRA, M.; DAS, R. Quantum mechanical wavefunction: Visualization at undergraduate level. **European Journal of Physics**, v. 38, n. 1, p. 1-13, 2017.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Consequências das descontextualizações em um livro didático: uma análise do tema radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 36, p. 1-11, 2013.

DOS SANTOS, B. F.; MORTIMER, E. F. Ondas semânticas e a dimensão epistêmica do discurso na sala de aula de Química. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 24, n. 1, p. 62, 2019.

DUBSON, M. *et al.* Faculty disagreement about the teaching of quantum mechanics. In: PHYSICS EDUCATION RESEARCH CONFERENCE, 2009, Melville. **Proceedings...** Melville: American Institute of Physics, 2009. p. 137-140.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas**. 19 ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1979.

FANARO, M. de L. A.; OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A. Teoremas-en-acto y conceptos-en-acto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, n. 3, 2009.

FANTIN, A. L. M. B. **O hibridismo da obra Física Quântica, de Eisberg e Resnick: entre duas tradições**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física**. São Paulo: Bookman Companhia Editora S.A., 2008. v. III.

GIL, D; SOLBES, J. The introduction of Modern Physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, v. 15, n. 3, p. 255-260, 1993.

GRECA, I. M.; FREIRE JÚNIOR, O. Does an Emphasis on the Concept of Quantum States Enhance Students' Understanding of Quantum Mechanics? **Science & Education**, v. 12, p. 541-557, 2003.

GRECA, I. M.; FREIRE JÚNIOR, O. Ênfase conceitual e interpretações no ensino da Mecânica Quântica. In: FREIRE JÚNIOR, O.; PESSOA JUNIOR, O.; BROMBERG, J. L. (Org.). **Teoria quântica: estudos históricos e implicações culturais**. Campina Grande: EDUEPB; São Paulo: Livraria da Física, 2011. p. 359-376. Disponível em: scielo.org. Acesso em: 3 fev. 2026.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 5, n. 1, p. 1-17, 2011.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma Proposta para o Ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 444-457, 2001.

GRIFFITHS, D. J. **Mecânica Quântica**. 2 ed. São Paulo: Pearson, 2011.

HOERNIG, A. F.; MASSONI, N. T.; LIMA, N. W. As visões sobre a ciência e sobre a realidade nos enunciados de Richard P. Feynman: Uma análise metalinguística de alguns de seus textos didáticos e de divulgação científica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20200019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0019>. Acesso em: 2 jun. 2025.

IRESON, G. The quantum understanding of pre-university physics students. **Physics Education**, v. 35, n. 1, p. 15-23, 2000.

KARAM, R. O que diferencia as Feynman lectures de livros tradicionais? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 4, e4204, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0071>. Acesso em: 15 abr. 2026.

KE, J-L.; MONK, M.; DUSCHL, R. Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. **International Journal of Science Education**, v. 27, n. 13, p. 1571-1594, jan. 2005.

LEVRINI, O.; FANTINI, P. Encountering Productive Forms of Complexity in Learning Modern Physics. **Science & Education**, v. 22, n. 8, p. 1895-1910, mar. 2013.

LIN, S. Y.; SINGH, C. Categorization of quantum mechanics problems by professors and students. **European Journal of Physics**, v. 31, n. 1, p. 57-68, 2010.

LOBATO, T.; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. **Ciência e Educação**, v. 11, n. 1, p. 119-132, 2005.

MACNAUGHT, L. *et al.* Jointly constructing semantic waves: Implications for teacher training. **Linguistics and Education**, v. 24, n. 1, p. 50-3, abr. 2013. Disponível em: <http://ro.uow.edu.au/sspapers/1157>.

MARTIN, J. R.; MATON, K.; DORAN, Y. J. **Accessing Academic Discourse**. First ed. New York: Routledge, 2020. v. 1.

MATON, K. **Knowledge and Knowers Towards da realist sociology of education**. 1 ed. New York: Routledge, 2014. v. 53.

MATON, K. Making semantic waves: A key to cumulative knowledge-building. **Linguistics and Education**, v. 24, n. 1, p. 8-22, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.linged.2012.11.005>.

MATON, K.; HOOD, S.; SHAY, S. **Knowledge-building Educational studies in Legitimation Code Theory**. Routledge, 2016.

MCKAGAN, S. B. *et al.* A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect. **American Journal of Physics**, v. 77, n. 1, p. 87, 2009.

MOHAN, A. K. Philosophical Standpoints of Textbooks in Quantum Mechanics. **Science and Education**, v. 29, n. 3, p. 549-569, 2020.

MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, v. 70, n. 3, p. 200-209, 2002.

OLSEN, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: A study in Norway. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 6, p. 565-574, jun. 2002.

POSPIECH, G. Philosophy and Quantum Mechanics in Science Teaching. **Science & Education**, v. 12, p. 559-571, 2003.

SINARCAS, V.; SOLBES, J. Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato. **Enseñanza de Las Ciencias**, v. 3, n. 31, p. 9-25, 2013.

SINGH, C; MARSHMAN, E. Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics. **Physics Education Research**, v. 11, p. 1-24, 2015.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).