

O PRINCÍPIO DA INCERTEZA EM LIVROS DIDÁTICOS DO ENSINO SUPERIOR: UMA ANÁLISE COM MÉTODOS QUANTITATIVOS INTERPRETATIVOS

THE UNCERTAINTY PRINCIPLE IN UNDERGRADUATE TEXTBOOKS: AN ANALYSIS WITH INTERPRETATIVE QUANTITATIVE METHODS

Miguel Rocha Bento¹, Nathan Willig Lima², Cláudio José de Holanda Cavalcanti³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Departamento de Física, miguel.r.bento@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Departamento de Física/Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, nathan.lima@ufrgs.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Departamento de Física/Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, claudio.cavalcanti@ufrgs.br

Resumo

O presente trabalho caracteriza a apresentação do Princípio da Incerteza em cinco livros didáticos do ensino superior, explicitando a relação das abordagens didáticas com elementos dos artigos seminais de Física Quântica. Discutem-se, também, as proximidades e diferenças das diversas abordagens didáticas. Para tanto, foi utilizado um método de análise interpretativa com métodos quantitativos, incluindo, mais especificamente, a análise logística de componente principal bi-variada. Através da análise dos nossos resultados, foi possível identificar quais elementos históricos foram apagados em cada texto didático, bem como aproximar os livros contemporâneos pela importância que dão ao Princípio em sua estrutura composicional, pelo formalismo matemático adotado, pelo uso de experimentos mentais e pela discussão filosófica e conceitual. Nossa principal conclusão é que, nos casos estudados, a apresentação de uma discussão filosófica e conceitual mais ampla é anti-correlacionada ao uso de um formalismo matemático avançado, reforçando o abismo existente entre ciências humanas e exatas e a cultura do “shut up and calculate” da Física Quântica.

Palavras-chave: Livro Didático, Análise Quantitativa, Física Quântica.

Abstract

The present work characterizes the presentation of the Principle of Uncertainty in five undergraduate textbooks, explaining the relationship of didactic approaches with elements of the seminal articles of Quantum Physics. The proximities and differences of the diverse didactic approaches are also discussed. To do so, we used a method of interpretative analysis with quantitative methods, including, more specifically, the Logistic Principal component analysis. Through the analysis of our results, it was possible to identify which historical elements were erased in each text as well as to bring contemporary books closer together according

to the importance they attach to the Principle in their compositional structure, by the mathematical formalism adopted, by the use of mental experiments and by philosophical and conceptual discussion. Our main conclusion is that, in the studied cases, the presentation of a broader philosophical and conceptual discussion is anti-correlated to the use of an advanced mathematical formalism, reinforcing the existing gap between soft and hard sciences and the “shut up and calculate” culture of Quantum Physics.

Keywords: Textbooks, Quantitative Methods, Quantum Physics

Introdução

Pelo menos desde a publicação da obra *A Estrutura das Revoluções Científicas* de Thomas Kuhn (1996), o livro didático é reconhecido como um elemento importante da cultura científica. Reconhecendo a importância desse gênero discursivo, e sua natural participação no contexto pedagógico, muitas pesquisas da área de Ensino de Ciências e Física tomam o livro didático como um objeto de estudo (CASSAB; MARTINS, 2008; MARTINS, 2006). Em especial, podemos mencionar pesquisas que discutem a apresentação de tópicos de Física Quântica em livros do ensino superior (LIMA *et al.*, 2015, 2016; MARINELLI; PIETROCOLA, 2018) e em livros de ensino médio (KOPP; ALMEIDA, 2019; LIMA *et al.*, 2018; LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017).

No contexto da Física Quântica, o Princípio da Incerteza desempenha um importante papel histórico (JAMMER, 1966), conceitual (GREENSTEIN & ZAJONE, 2006), sendo considerado um dos pilares da Interpretação de Copenhagen (HEISENBERG, 1958). O objetivo deste trabalho é investigar como cinco livros didáticos do ensino superior apresentam o Princípio da Incerteza, mapeando as semelhanças e diferenças entre as suas apresentações e avaliando suas relações com abordagens dos artigos seminais. Mais especificamente, ao longo do texto, responderemos as seguintes questões de pesquisa: a) quais são os métodos de derivação, as relações com outras teorias e conceitos e os formalismos matemáticos que podem ser associados ao Princípio da Incerteza nos artigos seminais? b) quais são os métodos de derivação, as relações com outras teorias e conceitos e os formalismos matemáticos que podem ser associados ao Princípio da Incerteza nos livros didáticos de ensino superior? c) Quais fatores aproximam e distanciam as apresentações dos livros didáticos entre si?

Referencial Teórico-Metodológico

O quadro teórico-metodológico deste trabalho é a Filosofia da Linguagem de Bakhtin (LIMA *et al.*, 2019). Mais especificamente foi adotada a concepção de método interpretativo de Bakhtin (2017), segundo a qual o processo investigativo consiste na associação de um enunciado específico (o objeto de estudos) com outros enunciados. Ademais, valemo-nos da proposta de integrar métodos quantitativos em uma pesquisa interpretativa (NASCIMENTO *et al.*, 2019)¹.

¹ Devido à limitação de espaço, não será possível explicar o quadro teórico-metodológico. O leitor interessado pode consultar os trabalhos citados.

Metodologia

Seguimos a metodologia de análise proposta por Lima *et al.* (2019) em associação com a possibilidade de introduzir métodos quantitativos na análise interpretativa, como já defendido na literatura (NASCIMENTO *et al.*, 2019; NASCIMENTO; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). As etapas da pesquisa foram as seguintes: A) Identificação dos enunciados: foram selecionados cinco livros de Física Quântica utilizados em disciplinas de graduação em Física. Foram, então, identificados todos os textos do livro que faziam menção ao Princípio da Incerteza. Considerando os critérios de delimitação do enunciado, cada seção do livro que fala sobre o Princípio da Incerteza corresponde a um enunciado singular (LIMA; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). B) Análise da responsividade: investigamos como os enunciados dos livros didáticos dialogam com os artigos originais, ou seja, como respondem aos textos científicos. Para tanto, seguimos a seguinte sequência de passos: 1) Estudamos o Princípio da Incerteza em obras historiográficas secundárias (GREENSTEIN; ZAJONC, 2006; JAMMER, 1966; LONGAIR, 2013). 2) A partir disso, estudamos obras historiográficas primárias, dando especial atenção ao artigo de 1927 no qual Heisenberg apresenta o Princípio da Incerteza pela primeira vez (HEISENBERG, 1983). Ao estudar essas obras, fizemos uma interpretação metalinguística (Lima *et al.*, 1927) – respondendo à primeira pergunta de pesquisa. Uma síntese de tal análise é apresentada na próxima seção. 3) A partir de elementos importantes encontrados nas obras primárias, foram criadas categorias de análise. Por exemplo, identificamos que o artigo de 1927 sofreu influência da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. Investigamos, posteriormente, quais livros apresentavam essa influência de forma explícita. Todos os elementos que consideramos importantes de ser analisados foram listados em uma tabela e, então, investigamos se os livros os apresentavam ou não. C) Análise estilística: no presente trabalho, em especial, analisamos qual era o papel do Princípio da Incerteza na estrutura composicional do texto, isto é, se ele é um capítulo, uma seção, ou apenas aparece ao longo do texto sem destaque. Ademais, analisamos se o conceito é apresentado como forma de introdução à Física Quântica ou ao longo do texto. Tal análise discursiva permite averiguar a centralidade e o destaque que o Princípio da Incerteza recebe na estrutura do texto. D) Integração dos resultados: esta etapa corresponde ao que será apresentado na segunda subseção da seção de resultados. Uma vez que as associações entre os enunciados dos livros didáticos e os artigos originais foram mapeadas quantitativamente (conforme é possível ver na tabela 1), respondendo à segunda pergunta de pesquisa, foi possível sintetizar os resultados através de uma análise de componente principal logística, visualizada por meio de um biplot, o que nos permite responder a terceira questão de pesquisa.

Resultados

Os resultados estão subdivididos em duas subseções, a primeira sobre nossa análise dos artigos seminais e literatura especializada e o segundo sobre os livros didáticos.

A Articulação e Estabilização do Princípio da Incerteza²

Em 1927, disputavam dois programas de pesquisa: a Mecânica Matricial de Heisenberg e a Mecânica Ondulatória de Schrödinger. Embora a equivalência matemática entre os dois programas já estivesse sendo considerada, havia uma disputa intensa pela interpretação da teoria, visto que o primeiro programa baseava-se em noções como descontinuidade, partículas, saltos quânticos, enquanto o segundo tratava de sistemas contínuos, como ondas. O objetivo de Heisenberg (1967) era encerrar a discussão, apresentando a interpretação final da teoria.

Fortemente inspirado pela Teoria Especial da Relatividade, segundo a qual medidas de intervalos temporais e espaciais dependem da especificação dos relógios e réguas, Heisenberg propõe que todo parâmetro físico observável só pode ser entendido por meio de uma medição. Adotando experimentos mentais, como o famoso microscópio de raios gama (perspectiva mais tarde criticada), Heisenberg argumenta que o produto das incertezas no momento e na posição obedecem a uma certa expressão matemática. O autor ainda generaliza tal resultado para todos os observáveis conjugados, sem oferecer uma demonstração dessa generalidade. Apesar disso, faz uma demonstração matemática do Princípio da Incerteza utilizando o formalismo matemático da Teoria de Transformação de Jordan e Dirac, mostrando que, para um pacote gaussiano, o produto das incertezas na posição e momento é igual a $\Delta x \cdot \Delta p = \hbar/2$. Essa não é a notação de Heisenberg, e, de fato, ele não chegou à constante $\hbar/2$ apenas por um problema na definição sobre o que seria o erro. Além disso, o princípio foi expresso como uma igualdade e não desigualdade. Isso se deve ao fato de Heisenberg ter usado um pacote gaussiano, que corresponde, justamente, ao caso limite da expressão. Posteriormente, Bohr apontou vários problemas na linha de argumentação de Heisenberg, mostrando que ele não havia conseguido se livrar do problema da dualidade onda-partícula. A tentativa de Bohr de superar esses problemas daria origem ao Princípio da Complementaridade (JAMMER, 1966). Em 1928, Pierre Weyl generalizou o princípio para pacotes não-gaussianos (já usando o formalismo da mecânica

² A etapa de análise dos trabalhos originais, em diálogo com a literatura especializada, foi realizada em consonância com o que Bakhtin chama de processo de interpretação – ou seja, um método de pesquisa qualitativo (Lima et al., 2019). Ao fazer a narrativa sobre o que encontram, os autores privilegiam determinados aspectos e silenciam outros, explicitam relações que dependem de suas perguntas de pesquisa e de seu “excesso de visão”. No presente trabalho, tal etapa foi necessária para criar categorias de análise, as quais foram, então, usadas para fazer uma interpretação dos livros didáticos. Esse processo é iminentemente qualitativo – relacionamos os livros didáticos com os artigos originais. Quando se quer analisar muitos enunciados, como no caso do presente trabalho, é útil, entretanto, se acrescentar uma etapa quantitativa (NASCIMENTO et al., 2019; NASCIMENTO; OSTERMANN; CAVALCANTI, 2017). Os resultados de tal quantificação foram sintetizados na tabela 1. Então, pode-se usar os métodos de análise estatística. Os resultados são, novamente, interpretados à luz das etapas anteriores. Ou seja, só é possível interpretar os resultados quantitativos tendo em mente os resultados obtidos na interpretação bakhtiniana.

ondulatória e chegando em uma desigualdade) e, no ano seguinte, Robertson demonstrou o princípio para dois operadores quaisquer que não comutam.

Análise dos Livros Didáticos

Primeiramente, a partir do estudo dos artigos seminais e da literatura especializada, criaram-se categorias de análise sobre o formalismo matemático, a forma de derivação e outros aspectos relacionados ao Princípio da Incerteza. Além disso, analisamos o papel que a apresentação do Princípio desempenha na estrutura composicional do texto (Lima *et al.*, 2019). Os resultados foram, então, sintetizados na tabela 1. Com isso, pode-se diretamente ver quais elementos dos trabalhos originais estão ou não presentes nos livros didáticos bem como a centralidade do assunto na estrutura do texto. Apenas olhando para a tabela, não é possível identificar com clareza o que aproxima ou distancia os livros. Assim, para facilitar a interpretação dos resultados da tabela foi realizada uma Análise de Componente Principal Logística (LANDGRAF, 2015) – biplot³.

Tabela 1. Resultados obtidos com as categorias de análise. Fonte: os autores.

		Griffiths (2005)	Eisberg (1985)	Cohen (1991)	Messiah (1961)	Shankar (1994)
	Primeiro Capítulo	1	0	1	0	0
	Um Capítulo	0	0	0	1	1
	Uma seção	1	1	1	0	0
Forma de Derivação	Analogia direta com onda clássica	1	1	1	1	0
	Experimentos Mentais	0	1	1	1	1
	Pacote gaussiano com Transformada de Fourier	0	0	0	1	1
	Pacote Não-Gaussiano	0	0	1	1	0
	Desigualdade de Schwarz	1	0	0	1	1
Experimentos mentais	Microscópio de raios gama	0	1	0	1	1
	Experimento com fendas (ondulatório)	0	1	1	1	1
	Alusão a uma onda clássica	1	1	1	1	0
	Deflexão em um campo magnético	0	0	0	1	0
	Colisão com fóton	0	0	0	1	0
Formalismo Matemático	Semiclássico	1	1	1	1	1
	Função de Onda	0	0	1	1	1
	Brackets	1	0	1	1	1
Outros elementos	Faz alusão à relatividade	0	1	0	0	0
	Menciona o formalismo da Transformação	0	0	1	0	0
	Faz discussão filosófica	0	1	0	0	0
	Faz conexão com dualidade onda partícula	1	1	1	1	0
	Faz conexão com complementaridade	0	1	1	0	0

³ A Análise de Componente Principal (ACP) padrão é aplicada a dados contínuos, servindo basicamente para o que se chama redução de dimensão, ou seja, em vez de analisar um conjunto de dados observados em termos de todas as suas variáveis originais, é possível reduzir a novas variáveis que são combinações lineares das variáveis originais, chamadas componentes principais, preservando as principais informações dos dados originais no menor número de dimensões (componentes principais) possível. A Análise de Componente Principal Logística (ACPL) é uma reformulação da ACP que pode ser usada quando os dados são binários, tais como os da tabela 1. O biplot é a visualização obtida pela ACPL (ou ACP) que permite projetar, em geral em um plano, os dados originais, multidimensionais. Por exemplo, os dados da tabela 1 possuem cinco dimensões (os livros), tendo sido projetados em duas no biplot da figura 1. A qualidade da visualização bidimensional é boa, uma vez que reteve 91,19 por cento da variância original dos dados.

A partir da figura 1, podemos fazer a seguinte análise: considerando apenas os aspectos estudados, pode-se dizer que os livros de Cohen e Griffiths são mais semelhantes entre si, e distinguem-se mais do livro de Shankar (estão mais próximos no mapa, no quadrante oposto ao qual Shankar está). Pelo mesmo motivo as abordagens de Messiah e Eisberg são também as mais distintas entre si. As setas mostram os atributos (linhas da tabela 1) que mais aproximam (similaridade) ou afastam (dissimilaridade) os livros. O que aproxima Cohen e Griffiths é o fato de tratarem o assunto já no primeiro capítulo do livro, fazendo uma analogia com a onda clássica (esses dois elementos também estão correlacionados entre si, pois as respectivas setas fazem entre si ângulo menor do que 90 graus), enquanto que Shankar é diferenciado dos demais pelo fato de trabalhar experimentos mentais e, principalmente, o experimento do microscópio de raios gama. Por outro lado, a abordagem de Messiah é fortemente associada à desigualdade de Schwarz, uso de brackets e discussão sobre experimentos, enquanto Eisberg se diferencia por fazer uma discussão filosófica e apresentar a influência da Teoria da Relatividade Restrita e sua relação com a Complementaridade.

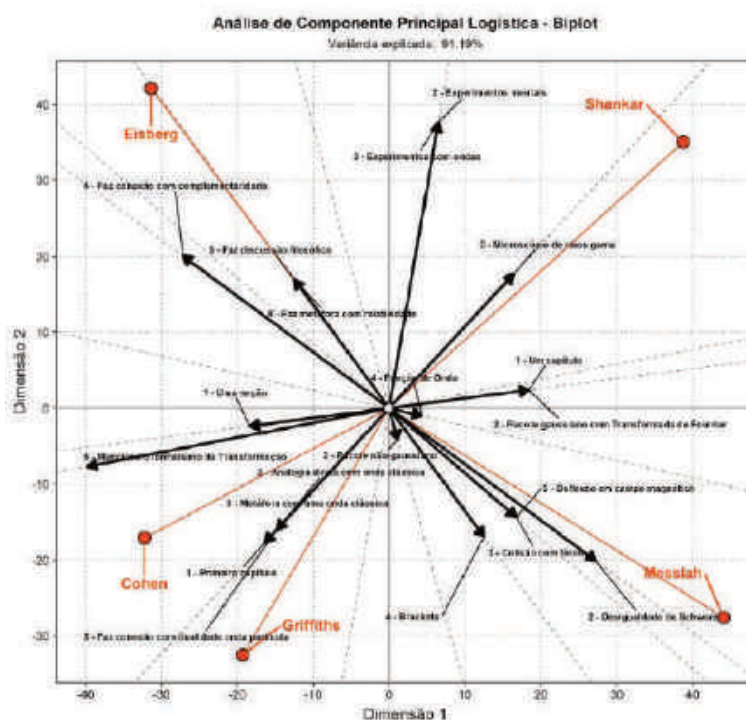


Figura 1. Análise de Componente Principal dos cinco livros (dados da tabela 1).
Fonte: os autores.

Considerações Finais

No presente trabalho, discutimos a apresentação do Princípio da Incerteza em cinco livros didáticos do ensino superior. A partir do estudo de trabalhos originais

e da literatura especializada, criamos categorias de análise que foram utilizadas, então, para analisar os livros, verificando quais elementos dos trabalhos originais estavam presentes nos livros didáticos. A partir dos resultados obtidos, fez-se uma análise de componente principal, o que nos permitiu verificar quais livros eram semelhantes e diferentes entre si. Por fim, é possível interpretar, a partir da análise, que o livro que trata aspectos filosóficos é anticorrelacionado ao uso de formalismo matemático mais avançado (seta com atributo *faz discussão filosófica* está em direção oposta à seta que representa o atributo *brackets*), o que parece um efeito da dicotomia entre ciências humanas e exatas, característica do nosso tempo. Assim, o presente trabalho contribui para a área de Pesquisa em Ensino de Física de duas formas. Primeiramente, o trabalho mostra a potencialidade de introduzir métodos quantitativos em uma interpretação qualitativa, viabilizando a análise de aspectos sutis de textos didáticos. Em segundo lugar, nossos resultados indicam a persistência da dicotomia formalismo matemático *versus* filosofia, característica de pedagogias positivistas. Entendemos, nesse sentido, que o trabalho corrobora a percepção de que é necessária uma virada didática no ensino de Física Quântica.

Referências

- BAKHTIN, Mikhail. *Notas sobre literatura, cultura e ciências humanas*. São Paulo: Editora 34, 2017.
- CASSAB, Mariana; MARTINS, Isabel. Significações de professores de ciências a respeito do livro didático. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 10, p. 1–24, 2008.
- COHEN-TANNOUDJI, Claude; DIU, Bernard; LALOË, Franck. *Quantum Mechanics*. New York: Wiley, 1991.
- EISBERG, R; RESNICK, R. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles*. New York: John Wiley and Sons, 1985.
- GREENSTEIN, G; ZAJONC, A G. *The Quantum Challenge – Modern Research on the Foundation of Quantum Mechanics*. Sudbury: Jones and Bartlett Publishers, 2006.
- GRIFFITHS, David J. *Introduction to Quantum Mechanics*. 2. ed. London: Pearson, 2005.
- HEISENBERG, Werner. *Physics and Philosophy*. London: Penguin, 1958.
- HEISENBERG, Werner. Quantum-Theoretical Re-Interpretation of Kinematic and Mechanical Relations. *Sources of Quantum Mechanics*. New York: Dover Publications, 1967.
- HEISENBERG, Werner. The Quantum Content of Kinematics and Mechanics. *Quantum Theory and Measurement*. Princeton: Princeton University Press, 1983.
- JAMMER, Max. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.
- KOPP, Felipe Augusto; ALMEIDA, Voltaire De. Analogias e metáforas no ensino de Física Moderna apresentadas nos livros didáticos aprovados pelo PNLD 2018. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, p. 69–98, 2019.

KUHN, Thomas. *The structure of Scientific Revolutions*. Terceira ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1996.

LANDGRAF, A. J. *Generalized Principal Component Analysis: dimensionality reduction through the projection of natural parameters*. (2015). 116 f. Tese (PhD), The Ohio State University, 2015.

LIMA, Nathan Willig *et al.* A História do Fóton em Livros de Física. *Enseñanza de las Ciencias*, v. extra, p. 1953–1957, 2015.

LIMA, Nathan Willig *et al.* 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.

LIMA, Nathan Willig *et al.* 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. 18, n. 1, p. 331–364, 2018.

LIMA, Nathan Willig *et al.* Uma Análise Bakhtiniana dos Enunciados sobre o Efeito Fotoelétrico em Livros Didáticos do Ensino Superior. *Enseñanza de las Ciencias*, v. extra, p. 1947–1951, 2016.

LIMA, Nathan Willig; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Claudio José de Holanda. Física Quântica no ensino médio: uma análise bakhtiniana de enunciados em livros didáticos de Física aprovados no PNLDEM 2015. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, p. 435–459, 2017.

LONGAIR, Malcolm. *Quantum Concepts in Physics: An Alternative Approach to the Understanding of Quantum Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

MARINELLI, Fábio; PIETROCOLA, Maurício. Uma Análise sobre a Realidade das Entidades Científicas em um Livro do Ensino Superior. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 23, n. 3, 2018.

MARTINS, Isabel. Analisando livros didáticos na perspectiva dos Estudos do Discurso : compartilhando reflexões e sugerindo uma agenda para a pesquisa. *Pro-Posições*, v. 1, n. 49, p. 117–136, 2006.

MESSIAH, Albert. *Quantum Mechanics - Volume 1*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1961.

NASCIMENTO, Matheus Monteiro *et al.* Métodos Quantitativos Interpretativos na Educação em Ciências: Abordagens para Análise Multivariada de Dados. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 19, n. 0 SE-Artigos, 26 dez. 2019.

NASCIMENTO, Matheus Monteiro; OSTERMANN, Fernanda; CAVALCANTI, Cláudio. Análises multidimensional e Bakhtiniana do discurso de trabalhos de conclusão desenvolvidos no âmbito de um mestrado profissional em ensino de Física. *Ciência & Educação (Bauru)*

SHANKAR, R. *Principles of Quantum Mechanics*. New York: Plenum Press, 1994.