

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA EM NÍVEL MÉDIO INICIANDO PELO CONCEITO DE SPIN

SPIN FIRST DIDACTIC SEQUENCE FOR TEACHING QUANTUM PHYSICS IN HIGH SCHOOL

Laura Maria Pedroso de Lacerda¹, Débora Coimbra²

^{1,2} Universidade Federal de Uberlândia/Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, ¹laura.lacerda@ufu.br, ²debora.coimbra@ufu.br

Resumo

Este trabalho analisa uma sequência didática sobre Física Quântica, tendo como subsídio os momentos didáticos da Teoria Antropológica do Didático. A sequência foi desenvolvida no município de Uberlândia/MG, junto a duas turmas do segundo ano do ensino médio, em oito aulas da disciplina Laboratório Criativo. O principal objetivo é evidenciar a viabilidade de ensinar Física Quântica para alunos no Ensino Médio, destacando abordagens que contribuam para sua implementação. A sequência teve início com a introdução de um questionário envolvendo o conteúdo de probabilidade, através do lançamento de moedas virtuais e, na sequência foi realizado o jogo "Q-bit". Aulas expositivas dialogadas aprofundaram os conceitos essenciais e as representações matemáticas pertinentes. Recursos audiovisuais, como vídeos e matérias de revistas eletrônicas, foram utilizados para enriquecer a compreensão. Uma roda de conversa foi conduzida, como oportunidade aos alunos de expressar dúvidas, insights e impressões sobre o material estudado. Os alunos registraram suas observações e compreensões por meio de reflexões por escrito e executaram exercícios padrão de lápis e papel, para o momento de trabalho da técnica. A fase culminante da sequência didática envolveu a análise crítica de uma notícia que relacionava conceitos de Física Quântica e o funcionamento do cérebro. Este exercício destacou que os alunos não apenas compreenderam princípios fundamentais, mas também foram capazes de estabelecer relações com outras áreas do conhecimento. Ao longo do desenvolvimento, observamos uma adesão significativa por parte dos estudantes, evidenciada por seu envolvimento ativo, a formulação de perguntas pertinentes e estabelecimento de associações. A experiência não apenas ratificou a eficácia da SD, mas ressaltou o impacto positivo da opção por práticas inovadoras, como o ensino da Física Quântica focado no conceito de spin, em consonância com resultados da literatura.

Palavras-chave: Ensino de Física; Física Quântica; TAD; Momentos didáticos; Jogo

Abstract

This study analyzes a didactic sequence on Quantum Physics using didactic moments from the Anthropological Theory of Didactics. The sequence was developed in Uberlândia/MG city, with two second-year High School groups and eight Creative Laboratory sessions. The primary goal is to find strategies to demonstrate the viability of teaching Quantum Physics to high school students. The series began with the introduction of a probability-based questionnaire, carried out using virtual

coins, and the "Q-bit" game was played. Dialogued explanatory classes elaborated important concepts and associated mathematical representations. Audiovisual materials, such as movies and articles from electronic publications, were used to enhance comprehension. A round table was formed to allow students to express their concerns, opinions, and feelings regarding the material being studied. Students expressed their observations and understandings in written reflections, and they practiced techniques with traditional pencil-and-paper exercises. The sequence culminated with a critical study of a news item that tied Quantum Physics topics to brain functioning. This exercise demonstrated that students not only understood fundamental principles, but could also draw connections to different areas of knowledge. Throughout development, we saw significant commitment from students, as shown by their active participation, relevant questions formulations and ideas associations. The experience not only validated SD's success, but also showed the benefits of adopting creative approaches, such as teaching Quantum Physics with a focus on the idea of spin, which is consistent with research findings.

Keywords: Physics Teaching; Quantum Physics; TAD; Didactic moments; Games

Introdução

Os currículos de ciências requerem ajustes contínuos e adaptações mais frequentes em comparação a outras áreas, uma vez que estão intrinsecamente vinculados a um equilíbrio sensível entre influências externas, inerentes ao sistema educacional, e demandas internas específicas deste ramo. Dada a natureza em constante transformação dos conhecimentos científicos, torna-se imperativo revisar periodicamente esses programas, incorporando novos conteúdos e excluindo informações obsoletas. Esse processo dinâmico visa garantir que os alunos recebam uma formação atualizada e alinhada às exigências contemporâneas.

O presente trabalho busca inserir conceitos de Física Quântica junto aos alunos do ensino médio, com o intuito de superar desafios como a complexidade do formalismo matemático, interpretações filosóficas pouco persuasivas e quebrar a barreira que muitas vezes torna o ensino de Física aparentemente incompreensível. A proposta busca oferecer uma metodologia mais acessível e envolvente.

Optamos pela abordagem Spin First, uma perspectiva que inicia pelo Experimento de Stern-Gerlach e as bases discretas de spin- $\frac{1}{2}$ (matrizes de Pauli), como contexto para introduzir os postulados da física quântica. Os estudos são baseados na notação de Dirac, segundo a qual, os estados são representados como vetores de dois estados, relacionados à medição de uma partícula com spin para cima ou para baixo. Segundo Sadaghiani (2016) e Schermerhorn *et al.* (2020), esta

abordagem permite que os alunos se concentrem primeiro em conceitos abstratos cuja matemática é simples (a álgebra linear fornece uma linguagem matemática acessível à educação básica - multiplicação de matrizes - em consonância à prescrição da BNCC¹), antes de fazer a transição para os formalismos matemáticos complexos como no contexto de funções de onda.

Inspirados em disponibilizar abordagens inovadoras para o ensino de Física Moderna e Contemporânea em nível médio, apresentamos o design e a validação de uma sequência didática (SD), desenvolvida com base na Teoria Antropológica do Didático, a qual é abordada na próxima seção.

Elementos da Teoria Antropológica do Didático: os momentos didáticos

Segundo Almouloud (2010), os conhecimentos só podem ser apreendidos através de atividades e problemas que possam ser resolvidos pela mobilização deles. Para isso, a teoria antropológica do didático (TAD) estuda as condições de viabilidade e o funcionamento dos sistemas didáticos, entendidos como relações “sujeito - instituição do saber”. No presente trabalho, as instituições envolvidas são a escola, através do currículo oficial e do vivido, e a universidade, pelo compromisso com a formação inicial e continuada de professores e sua participação em relação ao currículo pretendido. Outras instituições concorrem para a determinação do currículo oficial, mas não são o foco deste estudo.

De acordo com Pasqualetto (2018), a estrutura praxeológica refere-se a uma abordagem teórica que visa compreender como os conhecimentos são adquiridos e como evoluem na mente dos estudantes. Não se pode presumir que haja uma única abordagem para estruturar o processo de estudo em uma organização praxeológica. A TAD identifica a existência de seis momentos didáticos, os quais não devem ser interpretados como uma sequência estritamente ordenada, uma vez que podem ocorrer de forma simultânea e em diferentes fases do processo de estudo. Chevallard (1999, *apud* PASQUALETTO, 2018, p. 50), os descreve como:

- I) Momento do primeiro encontro com a organização praxeológica;
- II) Momento da exploração do tipo de tarefas e da elaboração de uma técnica relativa;

¹(EM13MAT301) Resolver e elaborar problemas do cotidiano, da Matemática e de outras áreas do conhecimento, que envolvem equações lineares simultâneas, usando técnicas algébricas e gráficas, com ou sem apoio de tecnologias digitais. Disponível em:
<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#medio/a-area-de-matematica-e-suas-tecnologias>

- III) Momento da constituição do bloco tecnológico-teórico relativo à técnica;
- IV) Momento do trabalho da técnica com a intenção de torná-la mais eficaz e confiável;
- V) Momento da Institucionalização, que tem por objetivo definir o domínio da organização;
- VI) Momento da Avaliação, que prevê a oportunidade de reflexão acerca do que foi “aprendido”.

Considerando essa abordagem, o presente trabalho visa descrever uma sequência didática implementada com estudantes de duas turmas do segundo ano do Ensino Médio em uma escola pública da rede estadual de Uberlândia. Em consonância com a reestruturação do Novo Ensino Médio, as atividades foram conduzidas na disciplina denominada “Laboratório Criativo”, ao decorrer dos meses de outubro e novembro de 2023.

Metodologia

A sequência didática constitui um redesenho de aplicação anterior (COIMBRA, 2021), acrescentando algumas atividades. Foram necessários oito encontros, iniciando com o levantamento das concepções dos estudantes sobre os conceitos de equiprobabilidade, eventos independentes e hipótese ergódica, o qual foi desenvolvido pelo seguinte questionário, utilizando o aplicativo *Rossman/Chance Applet Collection*²:

- 1) Quais são os possíveis resultados quando você joga uma moeda?
- 2) Suponha que você jogou uma moeda duas vezes, e obteve como resultado CARA-CARA. Você consegue adivinhar qual o próximo resultado? Explique.
- 3) Jogue uma moeda 3 vezes e registre seus resultados. Você consegue adivinhar o próximo resultado? Explique.
- 4) Utilize o aplicativo para montar uma tabela explicitando o número de moedas, de caras e coroas em um lançamento.
- 5) Dado a tabela da questão anterior, o que aconteceria se você lançasse uma moeda: a) 50 vezes?; b) 100 vezes?
- 6) Jogue 1 moeda cinco vezes, e 5 moedas uma vez. Registre seus resultados. O que você consegue perceber?

As primeiras perguntas tinham como objetivo que os alunos percebessem a independência dos eventos, pois os possíveis resultados não são alterados pelos eventos anteriores. As últimas questões, como a pergunta 5 - "O que ocorreria ao lançar uma moeda 50 vezes? E 100 vezes?" - explora a noção de probabilidade

² Aplicativo Rossman/Chance Applet Collection, disponível em:
<https://www.rossmanchance.com/applets/2021/oneprop/OneProp.htm>

frequentista: ao aumentar o número de lançamentos, a tendência é que os resultados experimentais se aproximem apenas em média, dos esperados teoricamente. Optamos por não traduzir o aplicativo, pois a tradução literal oferecida não corresponde aos termos adequados no nosso idioma.

No encontro seguinte, os alunos foram convidados a jogar o Jogo dos Q-bits³, o qual introduz a natureza probabilística de uma medida individual no contexto da Física Quântica, além de distinguir entre a expectativa teórica e frequentista das medidas individuais, modelar as técnicas de estimativa estatística e identificar um processo markoviano (COIMBRA, 2021). Para sua implementação, era necessário a formação de duplas e um gerador de números aleatórios disponível no celular, configurado com a faixa de valores entre 0 e 20.

Esse jogo envolve uma disputa entre os participantes, sendo um deles denominado "Experimento" e o outro "Cientista". O objetivo é que o Cientista adivinhe um estado quântico previamente escolhido secretamente pelo Experimento a partir de um conjunto pré definido e conhecido por ambos, utilizando o menor número possível de medições. A pontuação é independente do resultado da medida e é atribuída somente ao Cientista a cada vez que a solicita ou que erra um palpite sobre o estado, cuja formulação é opcional. Os jogadores revezam os papéis em cada rodada e após a conclusão de algumas delas, divididas igualmente entre os jogadores em ambos os papéis, o vencedor é determinado, como no jogo de golfe, com base no menor número de pontos acumulados.

Na aula subsequente, uma roda de conversa foi conduzida, com o objetivo de promover uma reflexão sobre o jogo. Foram exploradas as percepções dos alunos ao participarem, investigando se os vencedores haviam adotado alguma estratégia para alcançar o êxito, e também o que poderia ser extraído de aprendizado por meio da experiência.

Uma aula expositiva dialogada foi realizada no encontro seguinte, interligando os conceitos da Física Quântica com o computador quântico. Para uma problematização inicial, foi apresentado o vídeo "Quantum Computers Animated"⁴. Essa aula foi desenvolvida no laboratório de informática. Foram exibidos e discutidos

³ Explicação do jogo Q-bits, página 443. Disponível em:

https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39326/3/Anais_XIII_EMIE.pdf

⁴ Produção da PHD Comics, disponível em <https://youtu.be/T2DXrs0OpHU?si=SEJTHeVfJSw20M3A>

os dois primeiros níveis do vídeo "Quantum computer experts explain"⁵ de Talia Gershon da IBM, o qual explora a superposição de estados e sua relação com o emaranhamento. Essas representações forneceram uma base sólida para associar às analogias das moedas apresentadas nos vídeos e na primeira atividade da sequência, com os estados de spin dos átomos. A discussão avançou, então, para o experimento de Stern e Gerlach, proporcionando uma compreensão mais profunda desses conceitos em um contexto prático e experimental. Os alunos expressaram suas reflexões por escrito.

No quarto encontro, uma exposição dialogada dos postulados da Física Quântica foi conduzida, inspirada na proposta de Carlos Eduardo Aguiar⁶, elucidando a definição de estado de um sistema físico e como se dá a representação deste na abordagem escolhida. Uma digressão sobre o conjunto dos números complexos é necessária, considerando as propriedades básicas como soma e produto, assim como em relação às matrizes. Nesse caso, a discussão é fundamentada na obtenção dos autovalores de spin e na representação dos autoestados em termos de diferentes bases. É relevante explorar as definições de operador hermitiano, produto interno e externo. Exercícios padronizados de lápis e papel oportunizaram que os estudantes praticassem a técnica aprendida.

Como encerramento desta sequência didática, analisamos a notícia veiculada no Jornal Lupa - Periódico Pedagógico, um projeto do programa "Se Liga na Educação" do estado de Minas Gerais. A notícia em questão, retirada do volume 15, intitulada "Cérebro quântico, a ousada teoria que aponta caminhos sobre o mistério da mente humana"⁷. Na atividade, os alunos realizaram uma leitura individual, seguida por uma roda de conversa, encerrando com um vídeo "O que significa o termo quântico?"

Análise dos resultados da aplicação

O Quadro 1 articula as atividades, as estratégias e os momentos didáticos de acordo com a teoria antropológica do didático (TAD).

⁵ Disponível em <https://youtu.be/OWJCFovochA?si=-WUXL26z0Y6QShF1>

⁶ Disponível em: https://www.if.ufrj.br/~carlos/palestras/mecanicaQuantica/ensinoMQ_UFRJ_2014_fev.pptx

⁷ Disponível em: https://drive.google.com/drive/folders/1lev_1si9f99IPm70PJ90KMqL2Gt7PPoG

Quadro 1: Sequência didática conceitos da Física Quântica

Encontro	Atividade	Estratégia	Momento Didático
1º (1h/a)	Questionário com realização dos lançamentos com moedas virtuais.	Levantamento das concepções dos estudantes sobre os conceitos de equiprobabilidade, eventos independentes e hipótese ergódica.	Momento do primeiro encontro com a organização praxeológica (I).
2º (1h/a)	Jogo dos Q-bits.	Introduzir a natureza probabilística de uma medida individual, distinguir entre a expectativa teórica e as frequências das medidas individuais, modelar as técnicas de estimativa estatística e identificar um processo markoviano.	Momento da exploração do tipo de tarefas e da elaboração de uma técnica relativa (II).
3º (1h/a)	Roda de conversa.	Socialização de resultados	Momento da Institucionalização (V) e Momento da Avaliação (VI).
4º (2h/a)	Quem tem medo da Física Quântica?	Exposição dialogada subsidiada em recursos audiovisuais.	Momento da constituição do bloco tecnológico-teórico (III). Momento do trabalho da técnica (IV).
5º (2h/a)	Postulados da Física Quântica.	Exposição dialogada, escrita	Momento da constituição do bloco tecnológico-teórico (III). Momento do trabalho da técnica (IV).
6º (1h/a)	Cérebro Quântico - notícia do Jornal Lupa.	Validar a compreensão dos alunos acerca do conteúdo.	Momento da Avaliação (VI).

Fonte: Produzido pelas autoras.

Considerando a segunda atividade do Quadro I, na primeira turma, a maioria dos alunos demonstrou uma boa adesão ao jogo. Na segunda turma, houve interesse, mas também resistência. A leitura do roteiro foi semelhante em ambas, com dificuldades na compreensão das regras de pontuação. Os alunos demoraram mais para se adaptar na segunda, manifestando que o jogo gerava competição e intrigas. Alguns alunos tentaram relacionar a atividade a conteúdos não abordados previamente, parte da estratégia docente. Outro resultado interessante a evidenciar é o relato de uma aluna, parte da reflexão escrita solicitada no quarto encontro:

Na última aula de Laboratório Criativo consegui entender como um computador quântico funciona e, também, como esse conceito estava ligado ao jogo, outra coisa que foi citada pela professora é como na Física Quântica

as “células” são extremamente pequenas, quase impossíveis de serem enxergadas e muito frias. Além disso, entendi que a cura quântica não passa de marketing, porque não está ligado a nada pequeno e frio, ou seja, uma mentira.

Podemos observar que, além de citar os tópicos abordados com nexos textuais, o estudante utiliza o conceito de quântico no contexto físico para refletir sobre atualidades e, essas análises iriam fomentar a discussão sobre o funcionamento do cérebro no último encontro. Isso ocorreu em ambas as turmas. Por exiguidade de espaço, nos limitamos a esses destaques.

Considerações finais

Consideramos que esta SD alcançou as expectativas e os objetivos para o ensino de Física Quântica. Este tópico, notoriamente complexo e muitas vezes evitado devido ao receio em relação ao formalismo matemático, se revelou acessível mediante a seleção cuidadosa da abordagem. Ao longo do desenvolvimento, observamos uma adesão significativa dos estudantes, evidenciada por seu envolvimento ativo, pela formulação de perguntas pertinentes e de associações. A experiência não apenas ratificou a eficácia da SD, mas o impacto positivo da opção por práticas inovadoras, como o ensino da Física Quântica focado no conceito de spin, em consonância com os resultados de Sadaghiani (2016) e Schermerhorn *et al.* (2020), corroborando o entendimento do raciocínio matemático como estruturante do conhecimento físico.

Referências

ALMOULOU, Saddo Ag. **Fundamentos da didática da matemática**. Editora UFPR, 2010.

COIMBRA, Debora. Two Tasks to Teach Randomness and Probability Reasoning. In: BARQUERO, B.; FLORENSA, I.; NICOLÁS, Pedro; RUIZ-MUNZÓN, Noemí (Ed.). **Extended Abstracts Spring 2019**. Cham: Springer International Publishing, 2021. (Trends in Mathematics), p. 195–202. ISBN 978-3-030-76413-5.

PASQUALETTO, Terrimar Ignacio. O Ensino de Física via Aprendizagem Baseada em Projetos: um estudo à luz da Teoria Antropológica do Didático. 2018.

SADAGHIANI, Homeyra R. Spin first vs. position first instructional approaches to teaching introductory quantum mechanics. In: **Proc. Phys. Educ. Res. Conf.** 2016. p. 292-295.

SCHERMERHORN, Benjamin P. et al. Student perceptions of math-physics interactions throughout spins-first quantum mechanics. In: **2019 Physics Education Research Conference Proceedings (Provo, UT, 2019)**. 2020.