

CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA: UM ESTUDO PILOTO NO ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA

Historical Contextualization: a pilot study in teaching of Quantum Mechanics

Rafaelle da Silva Souza [rafaellesouza2@yahoo.com.br]

Instituto Federal da Bahia, Seabra - BA; Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Salvador - BA, Brasil

Indianara Lima Silva [indianara.slima@gmail.com]

Elder Sales Teixeira [eldersate@gmail.com]

Universidade Estadual de Feira de Santana, Departamento de Física, Feira de Santana, BA, Brasil

Recebido em: 13/11/2019

Aceito em: 13/05/2020

Resumo

O presente artigo apresenta uma proposta didática implementada em curso de Licenciatura em Física sobre Mecânica Quântica (MQ) com abordagem contextualizada por meio da História e Filosofia da Ciência (HFC) e da teoria sociointeracionista de Vygotsky. O objetivo é compreender quais as contribuições da utilização didática da HFC para compreensão conceitual da MQ pelos estudantes. Com mediação do professor e leitura de textos originais de cientistas buscamos estabelecer momentos dialógicos e de análise textual para posterior avaliação. A avaliação das atividades dos estudantes deu-se com adoção da Taxonomia de Bloom Revisada (TBR). Os resultados da pesquisa apontam que, apesar de certas dificuldades, a HFC exerceu papel importante no processo de ensino, uma vez que promovem ricas trocas histórico-conceitual, as quais são fundamentais para que estudantes prossigam com aprendizagem. No entanto, lacunas importantes em relação a aspectos conceituais básicos de MQ e decorrentes da elaboração da proposta didática precisam ser sanadas. Trata-se de uma investigação qualitativa empírica estruturada nas quatro fases da Engenharia Didática de Artigue.

Palavras-chave: Mecânica Quântica; História e Filosofia da Ciência; Licenciatura em Física.

Abstract

This paper presents a didactic proposal implemented in a degree course in Physics on Quantum Mechanics (QM) with a contextualized approach **through** History and Philosophy of Science (HPS) and Vygotsky's **sociointeractionist** theory. The goal is to understand the contributions of the didactic use of HFC to conceptual understanding of QM by students. With the teacher's mediation and reading of original texts by scientists, we seek to establish dialogical moments and textual analysis for further evaluation. Students' activities were evaluated by adopting the Revised Bloom Taxonomy (RBT). The research results show that, despite certain difficulties, HPS played an important role in the teaching process, since they promote rich historical-conceptual exchanges, which are fundamental for students to continue with learning. However, important gaps regarding basic conceptual aspects of QM and arising from the elaboration of the didactic proposal need to be remedied. It is an empirical qualitative investigation structured in the four phases of Didactic Engineering of Artigue.

Keywords: Quantum Mechanics; History and Philosophy of Science; Undergraduate Physics Courses.

Introdução

Pesquisas na área de ensino de Mecânica Quântica (MQ) apontam que muitas são as dificuldades dos estudantes em compreender os fenômenos quânticos (JOHNSTON *et al.*, 1998; GRECA e MOREIRA, 2001; CATALOGLU e ROBINETT, 2002; KOHNLE *et al.*, 2014; GRECA e FREIRE, 2014). Por consequência, se observa uma demanda de investigações que investem esforços na elaboração e implementação de propostas didáticas (GRECA e MOREIRA, 2001; MANNILA *et al.*, 2002; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; AKARSU, 2010; PANTOJA *et al.*, 2011; KRIJTENBURG-LEWERISSA *et al.*, 2017; ROCHA *et al.*, 2018; CUESTA 2018).

Apesar dos avanços, há um pequeno número de propostas didáticas que facilitam ao estudante uma discussão epistemológica da MQ. Pouco se vincula o conhecimento científico ao contexto histórico criando situações para que o estudante contextualize os conceitos estudados e tenham a possibilidade de fazer uma retomada histórica destes. Argumenta-se que essas ausências constituem barreiras para a compreensão histórico-conceitual, já que muitos dos conceitos fundamentais não são adequadamente discutidos (SINARCAS e SOLBES, 2013; CUESTA 2018).

Inserido nesse cenário, o presente estudo tem por objetivo relatar a elaboração, implementação e avaliação de uma proposta didática sobre MQ com abordagem contextualizada por meio da História e Filosofia da Ciência (HFC). Este trabalho envolve o estudo, em especial, do fenômeno do emaranhamento quântico e não-localidade com a perspectiva de descentralizar o ensino do que é conhecido como a velha MQ. Ao propor este estudo, com um viés histórico, contempla-se a evolução conceitual e metodológica da física em seu processo de construção. A título de informação, este artigo faz parte de uma pesquisa mais ampla desenvolvida no contexto de um curso de Doutorado.

A motivação para o trabalho surge da necessidade de investigar, no contexto de formação inicial de professores de física, em que medida uma abordagem contextualizada por meio da HFC contribui para a compreensão histórico-conceitual da MQ. Consideramos relevante tratar a compreensão dos fenômenos tomando inicialmente o contexto no qual se deram as reflexões teóricas propostas por Einstein, Podolsky e Rosen (EINSTEIN *et al.*, 1935) e Schrödinger (1935) promovendo seu reconhecimento como campo de investigação consolidado na Física (BELL, 1964; ASPECT *et al.*, 1982). Esses fatos se inserem em uma cadeia complexa e repleta de sutilezas, se estendendo entre a metade da década de 30 e a primeira metade da década de 80 (FREIRE JR, 2006), produzindo intensos debates até os dias atuais – aspectos importantes para o ensino.

Ainda, apesar da sua atualidade, temas como emaranhamento quântico e não-localidade são pouco discutidos nas disciplinas dos cursos de formação de professores de física. A importância do seu estudo recai nas possibilidades que oferece para compreensão do desenvolvimento da teoria quântica e das suas aplicações tecnológicas, mas sobretudo, em relação aos seus fundamentos e suas implicações. Esses são aspectos fundamentais quando se defende um ensino de física que proporcione uma imagem de ciência como processo em construção.

Por conseguinte, o uso didático da HFC para contextualização no processo de ensino configura uma abordagem que pode trazer contribuições para aprendizagem gerando entendimento do impacto científico, tecnológico e filosófico que a MQ trouxe para a cultura do século XX e XXI, bem como sua incompatibilidade com outras leis consolidadas na física (KRAGH, 1992). Além de facilitar a discussão de conteúdos fundamentais da teoria tornando-os mais acessíveis para compreensão.

No campo das possíveis contribuições da HFC para o ensino, têm-se a possibilidade de: 1) formação de uma cultura científica capaz de desenvolver nos estudantes uma postura crítica; 2) funciona como uma abordagem estruturadora na apresentação de um tema complexo; 3) caminho facilitador na compreensão de conceitos, leis, modelos e teorias científicas; e, 4) auxilia na construção de uma visão da ciência sem distorcer sua história na qual se envolve o empreendimento científico

como uma conquista de conhecimentos por aproximações sucessivas através de retificações e múltiplas rupturas (MATTHEWS, 1994, 1995; LOMBARDI, 1997; PEDUZZI, 1998; SOLBES e TRAVER, 2001; MARTINS, 2006; DELIZOICOV *et al.*, 2011).

Nesta abordagem o processo de ensino de um conteúdo científico pode beneficiar-se de uma contextualização para além de mencionar datas, cientistas e acontecimentos. A discussão de um contexto histórico em sala de aula não procura apresentar apenas a história dos vencedores, mas aborda as controvérsias, as idas e vindas e as trajetórias do desenvolvimento científico. Esses aspectos permitem que os estudantes compreendam as dificuldades, os obstáculos e os contextos culturais, filosóficos, tecnológicos etc., e podem interpretar a ciência como uma atividade humana realizada por homens e mulheres que apontam problemas e respostas em cada época, além de auxiliar na superação de dificuldades de aprendizagem (HODSON, 2009; KRAGH, 1989; MATTHEWS, 2015; GIL-PÉREZ *et al.*, 2001; SILVA, 2006; ALLCHIN, 2013).

Para viabilização da proposta consideramos que a leitura e discussão de textos originais de cientistas poderia facilitar a contextualização histórica, a compreensão de aspectos da MQ e a aproximação dos futuros professores o contato com importantes fontes bibliográficas por meio da utilização direta, bem como “oferecer subsídios à aprendizagem de teorias científicas, além de possibilitar discussões relevantes sobre a natureza” (SILVA, 2012. p. 2).

Vários autores como Moreira e Ostermann (1993), Gil Pérez *et al.* (2001), Holton (2003), Montenegro (2005), Praia *et al.* (2007) e Forato (2008) tecem argumentos que os textos originais de cientistas podem auxiliar os futuros professores a construir compreensão de ciência como um processo inacabado repleto de construções históricas influenciada pelo contexto sociocultural de cada época com teorias estabelecidas por rupturas, controvérsias e ideias alternativas. Segundo Montenegro (2005), os textos originais suprem às limitações apresentadas nos livros didáticos, os quais apresentam uma ciência limitada, linear e inquestionável. Logo, adotamos essa metodologia.

Nesses moldes, a implementação da proposta foi realizada na disciplina “Metodologia no Ensino de Física” do curso de licenciatura em Física da Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, em 2018. A disciplina é escolhida, em específico, por possibilitar a articulação teoria e prática ao conciliar o ensino da MQ com discussões histórico-conceitual e noções de sua importância para a futura prática docente¹.

O estudo piloto aqui apresentado serve para levantar questionamentos importantes pertinentes a elaboração e implementação de propostas didáticas no ensino da MQ, principalmente as que se referem às possíveis melhorias para o processo de ensino-aprendizagem. Os elementos aqui elencados vêm ao encontro da necessidade de se investir em uma melhor formação do professor, mais sólida e atual (OSTERMANN e PRADO, 2005). Esperamos potencializar o ensino por meio da HFC e no processo direcionar o estudante para refletir sobre o saber teórico aprendido.

Referencial teórico-metodológico

A presente investigação qualitativa empírica foi estruturada por meio da abordagem metodológica da Engenharia Didática, que situa o professor como o pesquisador responsável pelo planejamento, implementação e avaliação da proposta didática. Resulta em informações que representam um contexto local e, podem também, ser fonte complementar de informações obtidas

¹ No campo das didáticas um desafio que surge é: “como ajudar a outros a ensinar” (FELDMAN, 2004). Assumindo esse desafio, prevemos na proposta um momento didático com desfecho na discussão sobre transposição didática para o ensino médio. Não será aprofundado, mas tem o objetivo de chamar atenção para a necessidade de refletir em *como ensinar* conceitos de MQ na educação básica.

por outras técnicas para desvelar aspectos novos de um tema ou problema (ARTIGUE, 1994; 2015; LUDKE e ANDRÉ, 1986).

Segundo Artigue (1994), a Engenharia Didática quer seja vista como uma prática de pesquisa, quer seja uma prática de desenvolvimento, é uma intervenção com meta clara e definida. É processada a partir de quatro fases compostas por: 1) Delimitação do marco teórico e conteúdo específico; 2) Concepção e análise *a priori* de situações didáticas; 3) Experimentação; 4) Análise *a posteriori* e validação. É uma modalidade de pesquisa que se desenrola a partir da concepção, experimentação e avaliação de uma sequência de atividades desenvolvidas em sala de aula (ARTIGUE, 2015).

A proposta didática é construída em relação a conteúdos e atividades que se estruturam de modo a atender ao(s) objetivo(s) a que se propõe(m) no processo de ensino-aprendizagem. Em consequência, neste trabalho, requer duplo papel: elemento integrador entre a teoria e a prática como possibilidade para discutir propostas educativas desenvolvidas para formação inicial de professores de física na área de MQ direcionada aos estudantes de licenciatura em Física, sujeitos da pesquisa; e, estratégia investigativa como exercício prático relacionando conteúdos e teorias com metodologias didáticas-pedagógicas frente ao processo de ensino-aprendizagem. O desenho específico da proposta é apresentado considerando as quatro fases destacadas por Artigue (2015).

Primeira fase

O embasamento teórico da proposta didática foi realizado por meio de estudo envolvendo a dimensão epistemológica, histórica e institucional, e levantamento dos conhecimentos necessários à formação do estudante (BRASIL, 2001; 2002; 2015), traduzindo-os em situações que possibilitem o desenvolvimento da aprendizagem. A partir de referenciais, adotamos o uso da HFC como abordagem didática para o ensino de MQ fundamentada na teoria sociointeracionista de Vygotsky (1989).

Vygotsky em sua teoria sociointeracionista tem como unidade de análise a interação social que instiga o processo de ensino-aprendizado. Desta concepção, para explicar o processo de absorção/construção do conhecimento, Vygotsky formula o conceito de Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP), que definiu como distância entre o nível de desenvolvimento real (aquilo que o indivíduo consegue elaborar sozinho) e nível de desenvolvimento potencial (o que o indivíduo consegue elaborar com ajuda de alguém); assim a aprendizagem é consequência do desenvolvimento construído, um processo que se expressa primeiro externamente para depois ser internalizado (VYGOTSKY, 2007).

O processo de desenvolvimento se constitui na apropriação do conhecimento disponível na sociedade, sendo assim, a história da sociedade e o desenvolvimento do homem caminham juntos. Segundo Vygotsky, a aquisição de habilidades necessárias para reconstruir e reelaborar os conceitos transmitidos pelo grupo cultural se dá por meio de uma formação dinâmica e dialética, a partir da interação com instrumentos, símbolos e outros indivíduos da sua espécie. O sujeito, ao mesmo tempo que internaliza as formas culturais, as transforma e intervém na sociedade, constituindo uma relação intersubjetiva dentro do contexto social e cultural do ambiente que o cerca. É uma relação dialética, ativa e transformadora que o sujeito estabelece com o seu meio.

Em concordância com esses aspectos, apresentamos a MQ em contextos históricos de evolução conceitual buscando na filosofia da ciência elementos de análise para enriquecer a visão da ciência dos estudantes - não resumindo a MQ em simples formulações matematizadas sobre os conceitos quânticos - a fim de proporcionar o desenvolvimento dessas funções através da HFC, possibilitando elevar o nível de abstração dos estudantes até o uso operacional presente nos livros e apostilas. Assim sendo, o problema proposto deve encontrar-se na ZDP, que é a região entre o nível de desenvolvimento real do indivíduo, avaliada a partir da sua capacidade de solução autônoma de

tarefas, e o seu grau de desenvolvimento potencial, estimado a partir da sua competência na solução das tarefas com o ajuda do docente ou de colegas mais capazes (VYGOTSKY, 1994). Assim, o ensino da MQ a partir da HFC com foco em uma narrativa do processo de construção científica permitirá um grau maior de abstração possibilitando abrangência e complexidade. O professor orienta os estudantes na narrativa, por meio de um processo de análise crítica para discutir, interagir e questionar sobre a história da ciência apresentada (HEERING e HÖTTECKE, 2014).

O conteúdo selecionado envolve desdobramentos da teoria, a partir de 1935, com a discussão levantada por Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) acerca da (in)completude da teoria quântica. Nesse artigo, pautados em um experimento mental que analisaram a posição e o momento linear de duas partículas que teriam interagido questionando sobre realidade e localidade, os autores desenvolveram argumentos que procurava mostrar a incompletude da teoria quando interpretada seguindo os padrões do grupo de Bohr (EINSTEIN *et al.*, 1935). As críticas provocaram discussões conceituais sobre a natureza dos estados ditos “correlacionados” ou “emaranhados” e depois, motivou investimentos em atividades experimentais. Entre as relevâncias desta temática, por exemplo, está que o emaranhamento entre sistemas quânticos – fenômeno derivado dos estudos em questão – o qual tem prometido aplicações como a criptografia quântica e computadores quânticos.

No mesmo ano, em 1935, Bohr e Schrödinger, individualmente, apresentam respostas ao artigo de EPR. Destacamos destes o famoso experimento mental do gato de Schrödinger também será discutido (SCHRÖDINGER, 1935). Nesse, o acoplamento de um sistema quântico a um clássico (um gato) conduziria este último à superposição dos estados de “vivo” e “morto” (simultaneamente). Este resultado absurdo, considerando a Mecânica Clássica, enfatiza a questão sobre o adequado limite entre sistemas clássicos e quânticos. Cerca de três décadas depois – vários trabalhos foram desenvolvidos ao longo desse tempo, mas por fins didáticos optamos por tal recorte histórico – Bell (1964) propõe um teorema que destaca a não-localidade e estabelece as chamadas desigualdades de Bell que fornecem um critério simples para testar qualquer teoria local de fenômenos naturais, formulada sob o marco do realismo e evidenciam que a MQ não é uma delas. Os resultados favoráveis à MQ são confirmados experimentalmente por Aspect *et al.* (1982). O emaranhamento começou a se estabelecer como uma propriedade efetiva do mundo quântico.

Toda essa discussão é marcada por descrições, proposições teóricas e realizações experimentais que fornecem indícios dos caminhos trilhados para a construção dos conceitos em questão. Dada a dificuldade e ausência de trabalhos empíricos neste tema, se propõe um caminho que contém importantes ingredientes para promover ricas trocas histórico-conceitual, as quais são fundamentais para que os estudantes consigam avançar em seu aprendizado.

Para contemplar essa discussão em sala de aula, uma contextualização histórica do conteúdo foi conduzida. Inicialmente, selecionamos quatro textos originais de cientistas² relevantes para o contexto em questão. A saber, os títulos dos textos e seus respectivos autores³:

- 1) Pode a descrição da Mecânica Quântica sobre a realidade Física ser considerada completa? – Einstein, Podolsky e Rosen (1935)
- 2) Sobre a situação atual na Mecânica Quântica – Schrödinger (1935)

² Cabe salientar que chamamos de ‘**texto original de cientistas**’ as traduções para a língua portuguesa a fim de tornar acessíveis e facilitar a leitura para os estudantes.

³ Um compilado com os textos pertinentes a proposta didática foi organizado. Disponível em: https://drive.google.com/open?id=1_WXJ7nJfrmaNjVlgTjjuNSm-oHs5t38s. Acesso 15/05/2020. Além dos textos traduzidos para o português, ao compilado foi acrescentado uma narrativa histórica intitulada “O paradoxo EPR: um problema emergente da Mecânica Quântica”, que compreende os tópicos abordados e que foi utilizada para a elaboração das aulas. Além desta, foi acrescentado também o texto de Bohr em resposta ao artigo de EPR de 1935.

- 3) O Paradoxo de Einstein, Podolsky e Rosen – Bell (1964)
- 4) Teste experimental das Desigualdades de Bell usando analisadores variáveis no tempo – Aspect, Dalibard e Roger (1982)

Depois, acreditando que, por um viés histórico, torna-se possível compreender como avançam os conhecimentos científicos, buscamos construir situações dialógicas incluindo atividades que direcionem a discussão, leitura e interpretação de textos, uso de simulações computacionais e resolução de atividades de aprendizagem – que culminaram na proposta didática apresentada a seguir. Essa ponte possibilita a construção de uma boa estratégia de ensino, pois, conforme afirma Lima e Ricardo (2019), ao ler o estudante abstrai, cria e imagina os eventos descritos na sua leitura e, quando essa leitura apresenta conceitos específicos de física, através de sua interpretação, são criados pseudoconceitos, os quais, tratados didaticamente, podem se converter nos conceitos físicos pretendidos. O pseudoconceito, segundo Vygotsky (1994; 2008), é uma espécie de *pensamento por complexos* mais evoluído, que através da abstração, conduzem à formação de conceitos científicos.

Segunda fase

Definido o contexto histórico são estabelecidos objetivos de ensino-aprendizagem organizando um espaço profícuo para o desenvolvimento do estudante no âmbito dos aspectos Conceituais, Procedimentais e Atitudinais (CPA), os quais estão imbricados na constituição dos sistemas cognitivos dos estudantes. Trata-se de dimensões sistematizadas que podem ajudar na aprendizagem cognitiva, comportamental e social do conteúdo (COLL *et al.*, 1992; CONRADO e NUNES-NETO, 2018).

A tríade CPA ao envolver conceitos – que se referem ao conhecimento de fatos, acontecimentos, dados e fenômenos –, procedimentos – ações ordenadas com um fim – e, atitudes – envolve valores e normas – incluem também outros aspectos como o trabalho em grupo, o respeito, a ética e o trabalho com a diversidade que podem refletir positivamente no aprender. Deste modo, acabam por envolver os objetivos educacionais, definindo suas ações no âmbito concreto do ambiente de aula com aspectos indispensáveis à formação do futuro professor.

Em síntese, as aulas da proposta didática foram elaboradas para um conjunto de 8 encontros com duração de 1h30. O início é marcado pela apresentação da proposta e levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes por meio de atividade escrita e por uma exposição inicial do argumento de EPR. Ao término do primeiro encontro as leituras dos textos dos cientistas são indicadas e incentivadas. Nos encontros seguintes, ocorre a discussão do argumento de EPR, bem como suas consequências epistemológicas remetendo a questão da incompletude da MQ, ao processo de detecção do emaranhamento, sua dinâmica e sua relação com outro conceito central da MQ, a não-localidade – suplantadas por atividade de aprendizagem via interpretação dos textos lidos. A discussão estimulada sobre o emaranhamento é consolidada com foco nas desigualdades de Bell e na teoria das variáveis ocultas. Caminhando para o encerramento da proposta é discutido aplicações da MQ como computação, criptografia e teletransporte quântico abordando questões direcionem a reflexão sobre a percepção do impacto científico e tecnológico decorrente da MQ. Nas últimas aulas, partindo das aplicações da MQ, discutimos as possibilidades de seu ensino para o nível médio e os processos necessários para uma recontextualização (transposição didática) com a proposta de elaboração de um plano de aula voltado para o ensino médio com ênfase na aplicabilidade dos fenômenos quânticos na cultura do século XX e XXI. Como fechamento, um momento de *Feedback* e socialização de opiniões foi estabelecido com ênfase na discussão sobre *como* ensinar tópicos de MQ refletindo no papel da HFC na construção do conhecimento científico.

Nesse momento final, buscamos estreitar a relação da teoria à prática – embora seja uma atividade que diverge das usualmente presentes no ensino da MQ, a expectativa é que esta experiência auxilie na preparação dos futuros professores para discutir a teoria quântica neste nível de escolaridade. Não é intenção promover neste trabalho uma discussão sobre fundamentação teórica e metodológica de como ensinar tópicos de MQ no Ensino Médio, mas consideramos que o licenciado necessita de domínio deste tema, para que se possa aproximá-lo de sua prática docente.

No Quadro 1 apresentamos o plano da proposta didática⁴. É composto de descrições dos objetivos de ensino, objetivos de aprendizagem codificados por dimensões CPA – por exemplo C1, representa o conteúdo conceitual 1; P1, representa o conteúdo procedimental 1; A1, representa o conteúdo atitudinal 1; e assim por diante –, das listagem das atividades de aprendizagem – indicadas de AT1 a AT8⁵ –, e por fim os materiais.

Quadro 1: Plano esquemático da proposta didática

Aulas	Objetivos de ensino	Objetivos de aprendizagem (CPA)	Atividades de aprendizagem e materiais
1 e 2	<p>Apresentar, inicialmente, o contexto histórico do EPR e suas consequências epistemológicas para a MQ;</p> <p>Incentivar a leitura e análise de textos originais de cientistas.</p> <p>Propor a leitura de textos: 1. EPR (1935); 2. Schrodinger (1935).</p>	<p>(A1) Valorizar os conhecimentos prévios.</p> <p>(P1) Mobilizar uma compreensão inicial sobre o paradoxo do EPR e suas consequências a partir da leitura de textos originais de cientistas.</p> <p>(P2) Aprimorar a habilidade de trabalhar em grupo.</p>	<p>Apresentação do trabalho que será realizado.</p> <p>Utilização de uma atividade para apreciar as concepções prévias dos alunos (AT1). Discussão em dupla de questões de sondagem. Estabelecimento de discussão inicial sobre como o EPR apresentou uma nova configuração para o conhecimento da MQ e de como esse processo foi dinâmico. <i>Obs.</i> Haverá uso de slides.</p> <p>Solicitação aos alunos, no término da aula, a leitura de textos para a aula seguinte e que eles façam anotações de acordo com o guia de leitura fornecido (AT2). As anotações decorrentes dessa leitura serão socializadas através das discussões na próxima aula.</p>
3 e 4	<p>Discutir sobre o problema emergente da MQ, o paradoxo EPR.</p> <p>Discutir a detecção do emaranhamento e sua dinâmica em relação ao conceito de não-localidade.</p> <p>Propor a leitura do texto de Bell (1964) e a execução de simulação computacional sobre o Interf. de Mach-Zehnder.</p>	<p>(C1) Entender o paradoxo EPR e suas consequências epistemológicas.</p> <p>(P3) Apresentar as anotações para socializar as informações com a turma.</p> <p>(P4) Avaliar a coerência das informações levando em consideração os interesses subjacentes.</p> <p>(A2) Tomar consciência mais geral sobre os aspectos da MQ e de como exigem uma mudança paradigmática.</p> <p>(A3) Responder as questões concernentes a atividade proposta de leitura de texto.</p>	<p>Apresentação das anotações pelos alunos e a mediação do professor nas discussões sobre a temática. O professor provocará os alunos para verificação da compreensão dos textos. Um vídeo sobre o “Gato de Schrödinger” será exibido(https://www.youtube.com/watch?v=UjaAxUO6-Uw).</p> <p>Reforçar a importância dos alunos compreenderem o comportamento das partículas subatômicas e de como este coloca em questionamento a realidade Física na MQ. Uma atividade será proposta a partir da apresentação de uma pequena história que remete a incompletude da MQ (AT3). Uma discussão em dupla e coletiva de questões de sondagem será estabelecida.</p> <p>Solicitação aos alunos, no término da aula, a leitura do texto e a utilização de uma simulação computacional (AT4). Será fornecido roteiro de análise para o texto (AT5). As anotações decorrentes dessa leitura serão socializadas através das discussões na próxima aula.</p>

⁴ Um detalhamento da versão piloto da proposta didática está disponível em: https://drive.google.com/open?id=1sQfrOoJw7Ka_WfQhuHRiesK8gt0TMINI Acesso 15/05/2020.

⁵ A sequência de atividades propostas na integra está disponível em: <https://drive.google.com/open?id=1HPTnYlzbN1HcUsdh36lISbYxQtppAcP> Acesso 15/05/2020.

5 e 6	<p>Discutir como a teoria de variáveis ocultas altera o modo físico de pensar a natureza.</p> <p>Demonstrar através da ideia de entrelaçamento que o ato de medir um sistema quântico altera os resultados esperados.</p> <p>Propor a leitura do texto Aspect (1982).</p>	<p>(C2) Introduzir a discussão sobre Teorias de variáveis ocultas.</p> <p>(A4) Tomar consciência sobre como as desigualdades de Bell influenciou na produção do conhecimento da MQ.</p> <p>(P5) Estruturar a capacidade de interpretação de fenômenos quânticos (superposição de estados), mobilizando uma discussão através do interferômetro de Mach-Zehnder.</p> <p>(A5) Refletir sobre a dinamicidade e não linearidade da produção do conhecimento científico.</p> <p>Repete-se o (A3), ver.</p>	<p>Os alunos serão questionados sobre a realização das atividades solicitadas na aula anterior. Uma discussão será estabelecida relacionando o texto com o interferômetro de Mach-Zehnder e a Teorias de variáveis ocultas.</p> <p>Desse modo, o professor enfatizará que os aspectos dos fenômenos quânticos estudados até o momento. Além disso, uma atividade (AT6) será proposta na aula. Nessa atividade explora-se as relações históricas e conceituais do EPR e das desigualdades de Bell, destacando as contradições dos fenômenos quânticos.</p> <p>Ainda nessa aula o professor irá solicitar a leitura de um último texto original de cientista (AT7). Será enfatizado a importância de se conhecer e discernir quais fontes de informações são mais confiáveis, a validade das informações mencionadas, e a potencialidade destes para a formação docente.</p>
7 e 8	<p>Discutir a completude da teoria e a não-localidade de sistemas emaranhados.</p> <p>Aprofundar à compreensão do emaranhamento através das desigualdades de Bell.</p>	<p>(C3) Entender como o experimento de Aspect elucidou o paradoxo EPR.</p> <p>(C4) Compreender como as variáveis ocultas eram ou como poderiam ser incorporadas a teoria de uma forma significativa.</p> <p>(P6) Desenvolver a habilidade para resolver problemas conceituais e para correlacionar a fenomenologia quântica em um contexto experimental.</p> <p>Repete-se o (A3), ver.</p>	<p>Provocação e mediação sobre o texto científico lido pelos alunos para enfatizar os principais aspectos apontados no texto que serão relevantes para o entendimento de alguns conteúdos científicos relacionados ao tema (por exemplo: que o resultado obtido por Aspect invalida a explicação do comportamento correlacional de um sistema emaranhado por variáveis ocultas). Vídeos poderão ser exibidos, ver descrição das aulas.</p> <p>Discussão sobre o emaranhamento e desigualdades de Bell, destacando questões próprias à natureza da Ciência e pontuando a linguagem matemática. Também alguns aspectos de como se dá a aceitação de teorias na Ciência, quais são mais cruciais que outros e as visões dos cientistas no trabalho científico será argumentado.</p> <p>Ao término da aula uma leitura complementar será sugerida com o intuito de ver a MQ como produto. Isto é, ler sobre as aplicações na prática do conhecimento da MQ. Indicaremos o artigo de Davidovich "Informação Quântica: do teletransporte ao computador quântico" (http://www.if.ufrj.br/~ldavid/arquivos/fronteir.pdf) e, o artigo de Piqueira "Teoria quântica da informação: impossibilidade de cópia, entrelaçamento e teletransporte" (http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n4/03.pdf).</p>
9 e 10	<p>Apresentar aplicações da MQ com destaque para o impacto científico, tecnológico e filosófico que a MQ trouxe para a cultura do século XX e XXI.</p> <p>Discutir aspectos de transposição didática sobre MQ e temas</p>	<p>(C5) Compreender as principais aplicações da MQ e o impacto científico/tecnológico que promoveu a 2ª revolução quântica.</p> <p>(P7) Ampliar a capacidade de organização do discurso e da argumentação oral e escrita.</p>	<p>Essa aula será iniciada com a discussão das implicações da MQ – computação quântica; criptografia quântica; teletransporte quântico. Exibiremos um vídeo sobre Computação Quântica.</p> <p>Em grupo, os alunos serão convidados a realizar a atividade prática (AT8). A partir das discussões anteriores e da leitura complementar sugerida eles irão construir um plano de aula que contemple o paradoxo EPR e suas implicações, bem como aspectos da história da ciência.</p>

	discutidos para o nível médio	(P8) Desenvolver pensamento crítico sobre a necessidade de uma compreensão conceitual da MQ. (A6) Refletir sobre a prática docente em termos de ensino da MQ no nível médio.	Serão solicitados aos alunos que eles estabeleçam uma relação de re-contextualização de proposta, na qual eles devem repensar o conteúdo ministrado sendo que agora voltado para o nível médio. O plano de aula será apresentado na aula seguinte.
11 e 12	Discutir aspectos de transposição didática a partir de apresentações de propostas elaboradas pelos alunos Estimular reflexões sobre o ensino de tópicos da MQ no nível médio.	(A7) Refletir em como a MQ pode ser abordada no nível médio. (P9) Estruturar um plano de aula para o ensino de MQ no nível médio com uma linguagem acessível para propiciar compreensão e a consequente aprendizagem. (A8) Desenvolver atitudes, competências e habilidades pedagógicas. (A9) Mobilizar os conhecimentos da sequência didática que são relevantes para o ensino no nível médio.	Julgamos que é importante, também, que os estudantes conheçam reflitam sobre sua futura prática docente. É importante que estejam aptos a aborda tópicos de MQ no nível médio. Nesse sentido, a turma será dividida em três grupos diferentes, onde cada grupo deverá eleger um plano de aula. Cada grupo irá discutir principalmente se a proposta é adequada em termos de conteúdo e significado para o aluno da escola básica. Todas essas discussões serão mediadas pelo professor. Espera-se que o aluno perceba que a recontextualização da MQ para o nível médio deve ser uma ação executada com cautela, pois de um lado têm-se as exigências epistemológicas inerentes ao campo de conhecimento. Por outro lado, as exigências do domínio escolar. No final dessa aula será solicitado aos alunos que façam os ajustes necessários em seus planos de aula e encaminhem ao professor da disciplina.
13 e 14 15 e 16	Estimular reflexões sobre o ensino de tópicos da MQ no nível médio. Esclarecer possíveis dúvidas remanescentes.	(P10) Simular uma miniaula para o ensino médio. <i>Obs. Dois encontros serão destinados para esse bloco de atividade.</i>	A atividade de Miniaula é, na sua essência, um laboratório experimental. Ela consiste em uma simulação para o Ensino Médio sobre um tema específico da MQ. Primeiramente o estudante deve, a partir do seu tema, preparar uma aula de 20 minutos e preparar um plano de aula (aula anterior). Ele deve pensar no público alvo, no recorte do tema para o tempo disponível, na metodologia e dinâmica que utilizará. Por fim, estabeleceremos um feedback avaliativo.

Para validar teoricamente essa proposta, 6 professores de diferentes instituições de ensino superior foram contactados e imprimiram opinião. Em suas considerações, pontuou-se concordância com a estratégia de ensino, as delimitações de objetivos e conteúdos selecionados, a proposta foi considerada suficiente para uma aplicação piloto. No entanto, já nesse momento alguns dos professores manifestaram preocupações em termos de efetividade na aprendizagem dos estudantes, com o curto período de tempo destinado ao conteúdo de MQ e com o fato de se propor leitura de textos originais. Aspectos estes relevantes que serão retomados na discussão dos resultados.

Terceira fase

A implementação foi realizada na Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) – Bahia, de 03 de setembro a 10 de outubro de 2018, em uma turma de 7 estudantes do curso de licenciatura em física do 7º período na disciplina de Metodologia no Ensino de Física⁶. Essa disciplina tem uma ementa que, entre outros aspectos, prevê a execução de atividades específicas do ensino de física como preparar planos de aula, definir objetivos, escolher estratégias de ensino e recursos pensando a transposição didática de conteúdo – campo em potencial para a articulação da teoria-prática.

⁶A permissão para implementação e consentimento dos estudantes foi concedido e documentado.

Ressaltamos que, de acordo com a matriz curricular, os estudantes cursaram ‘Física Geral IV’ e ‘Física Moderna’ que prevê em ementa a abordagem de noções de Física Quântica e o estudo da Física desenvolvida no século XX, aspectos (teoricamente) facilitadores para o ensino de MQ aqui proposto.

No processo de implementação buscamos estabelecer uma relação professor-aluno com comunicação direta garantindo conforto e livre participação. A exposição do conteúdo era realizada com suporte de slides e constante incentivo ao diálogo. A coleta de dados foi por meio das produções escritas dos estudantes (resultantes do conjunto de atividades de aprendizagem), gravações de áudio/vídeo e anotações de observação direta participante.

Quarta fase

Os instrumentos de análise de dados, atividades escritas dos estudantes ao longo da aplicação da proposta, foram avaliados a partir da Taxonomia de Bloom Revisada (TBR) (ANDERSON *et al.*, 2001; FERRAZ e BELHOT, 2010). A TBR foi vista como ferramenta para medir a aprendizagem através de sua estrutura bidimensional sendo a dimensão conhecimento (coluna vertical) e o processo cognitivo (coluna horizontal). Com base nessas dimensões hierárquicas classificamos as atividades propostas (AT1-AT8) – o teor de cada atividade que será explicitado mais adiante, ao analisar as respostas dos estudantes – em função do que se pede do estudante. O Quadro 2 representa essa classificação que será explicada detalhadamente a seguir, enquanto o Quadro 3 explicita os objetivos educacionais de cada uma delas.

Quadro 2: Atividades propostas classificadas segundo a Taxonomia de Bloom Revisada

Dimensão do conhecimento	Dimensão do processo cognitivo					
	Lembrar	Entender	Aplicar	Analisar	Avaliar	Criar
Efetivo/Factual	AT1					
Conceitual			AT3 AT6	AT2, AT5 AT7		
Procedimental/ Procedural					AT4	AT8
Metacognitivo						

Quadro 3. Descrição das atividades elaboradas segundo objetivo educacional

Atividades	Conhecimento a ser adquirido	Objetivo educacional
AT1	-	Apontar o conhecimento que o estudante tem sobre a MQ
AT3 AT6	Essência da MQ	Analogia orientadora de perguntas para percepção cognitiva da teoria das variáveis ocultas
AT4	Limites entre a mecânica clássica e a teoria quântica	Manipular simulação computacional para percepção visual do fenômeno do emaranhamento quântico
AT2 AT5 AT7	Compreensão da (in)completude da MQ	Leitura e interpretação de textos com estímulo a compreensão por meio de questões abertas oportunizando discussões sobre o problema da completude, da não-localidade e do realismo na teoria quântica
AT8	Prática pedagógica e o ensino de MQ no nível médio	Inferir a partir de elaboração de plano de aula sobre quais as estratégias didáticas facilitam o ensino da MQ no nível médio

Segundo Anderson *et al.* (2001), a estrutura da TBR diferencia cada categoria, o que estaria relacionado à aquisição do conhecimento, desenvolvimento de habilidade e competência com base em definições cuidadosas para a dimensão do conhecimento (substantivos – o que) e a dimensão processo cognitivo (verbos – como).

A dimensão conhecimento está diretamente relacionada ao conteúdo e contém quatro subcategorias que se apresentam, de acordo com Anderson *et al.* (2001), da seguinte forma: **Conhecimento Efetivo/Factual** - conhecimento da terminologia e conhecimento de detalhes e elementos específicos - relacionado aos elementos básicos que os educandos devem saber para se familiarizar com a disciplina para solucionar problemas nela; **Conhecimento Conceitual** - conhecimento das classificações e categorias, conhecimento de princípios e generalizações, conhecimento de teorias, modelos e estruturas - consiste em conhecer às inter-relações entre elementos básicos de uma estrutura maior que permite-os funcionar juntos; **Conhecimento Procedural** - Conhecimento de conteúdos específicos, habilidades e algoritmos, Conhecimento de técnicas específicas e métodos, Conhecimento de critérios e percepção de como e quando usar um procedimento específico - é o conhecimento de como fazer algo, métodos de questionamentos, critérios para utilização de habilidades, algoritmos, técnicas e métodos; **Conhecimento Metacognitivo** - Conhecimento estratégico, Conhecimento sobre atividades cognitivas incluindo contextos preferenciais e situações de aprendizagem (estilos), e autoconhecimento - relacionado ao reconhecimento da cognição em geral e da consciência da amplitude e profundidade de conhecimento adquirido de um determinado conteúdo; essa última (Conhecimento Metacognitivo) equivale ao desenvolvimento do ponto máximo em um indivíduo.

A taxonomia representa uma hierarquia cumulativa, onde uma categoria da dimensão conhecimento mais simples é pré-requisito para a próxima categoria mais complexa, ou seja, para atingir o nível Conceitual (nível 2) da dimensão conhecimento é necessário atingir o nível Factual (nível 1), para atingir o nível Procedural (nível 3), é necessário atingir os dois primeiros níveis (Factual e Conceitual) (ROCHA, 2013). Em resumo e finalmente, a tabela chamada de bidimensional é utilizada para a classificação dos objetivos cognitivos da aprendizagem, ou seja, a forma verbal: Lembrar, Entender, Aplicar, Analisar, Avaliar e Criar.

O processo cognitivo para Anderson *et al.* (2001) é considerado como o meio pelo qual o conhecimento é adquirido, então: **Lembrar**, relacionado a lembrar-se do que aprendeu quando necessário, ou seja, capacidade de armazenar as informações e trazê-las à tona no momento oportuno; **Entender**, que consiste em dar sentido ao conteúdo de forma que seja possível seu entendimento e reprodução; **Aplicar**, refere-se à habilidade de utilizar o conhecimento adquirido para a resolução de problemas práticos e em novas situações; **Analisar** compreende a capacidade de fragmentar o conteúdo em partes menores para compreensão da estrutura final. O aluno precisa ser capaz de identificar as partes separadamente, comparando-as e identificando seus relacionamentos e seus princípios de organização na criação da estrutura completa; **Avaliar** é justamente a habilidade adquirida em fazer julgamentos de valor, ou seja, conseguir avaliar uma situação, um projeto, uma proposta com base em critérios internos ou externos para um fim específico; e por último a subcategoria **Criar**, que está relacionada à habilidade de acrescentar e unir partes na construção de uma nova estrutura, e relacionar partes não organizadas para formar uma nova proposta (KRATHWOHL, 2002). Nessas configurações, a TBR torna-se elemento possível para estabelecer relações de apreciação e análise crítica dos resultados.

Ainda, realizamos uma ‘reflexão sobre a ação’ – conceito proposto por Schön (2000). Para o autor, um pensar retrospectivo sobre a ação no qual o professor pode refletir no que aconteceu/observou permite analisar e adotar outros procedimentos. Se estabelece um pensamento reflexivo ao enfrentar as situações divergentes da prática e acabam por garantir uma intervenção prática racional. Portanto, a reflexão sobre a ação consiste em pensarmos retrospectivamente sobre o que fizemos, almejando descobrir como nosso ato de conhecer-na-ação pode ter contribuído para um resultado (in)esperado.

Resultados das atividades sob a ótica da TBR

Conforme sinalizado, a proposta foi elaborada a fim de fornecer meios aos estudantes para compreensão dos argumentos dos cientistas ao explicar os fenômenos quânticos, e, conseqüentemente, entendê-los. Consideramos que o debate das questões e o confronto entre os conceitos clássicos e quânticos, uma vez contextualizado trabalhando aspectos do argumento de EPR, situado na própria época em que se desenvolveu o problema/ideia científica, poderiam facilitar a compreensão e auxiliar na percepção das principais contribuições à ciência (capaz de fazer predições, generalizar observações, elaborar conjecturas explicativas etc.). Possibilita-se a compreensão da existência de inter-relações entre ciência, tecnologia e sociedade, uma vez que trata tópicos que envolve avanços teóricos relacionados a possíveis desenvolvimentos tecnológicos e que compõem discursos em circulação na atual conjuntura sócio-histórica (SILVA *et al.*, 2015).

Ressaltamos que discussões sobre argumento de EPR e temas afins não são comumente trabalhados nos cursos de formação inicial de professores de física. Os tradicionais livros didáticos utilizados nesses cursos, por exemplo, Fundamentos de Física (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009) e Física Quântica (EISBERG; RESNICK, 1979) não abordam, necessariamente, esse tópico. No entanto, reconhecemos a temática como relevante e importante para os professores em formação inicial por seu contexto e por desenvolvimentos promovidos a teoria quântica. O que torna sua abordagem em sala de aula uma experiência em potencial para revelar novos caminhos.

Esse processo foi observado sob a ótica da TBR a partir das atividades de aprendizagem. De posse das respostas dos estudantes serão analisados, como forma de ilustração, alguns fragmentos de respostas apresentadas⁷. Retomando as características da TBR, a dimensão do conhecimento Efetivo/Factual foi contemplada apenas na AT1 referente a atividade inicial para verificar os conhecimentos prévios dos estudantes. Na dimensão Conceitual, 5 atividades foram classificadas com dimensões cognitivas Aplicar (AT3, AT6) e Analisar (AT2, AT5, AT7). Por fim, a dimensão Procedimental se fez presente nas atividades (AT4 e AT8) e exige do estudante Avaliar e Criar (características mais avançadas no domínio cognitivo dos conteúdos discutidos) – dados Quadro 2.

Com uma análise cuidadosa das respostas dos estudantes foi possível observar alguns resultados preocupantes, intimamente relacionadas ao processo interativo do mesmo com o meio social em que estão inseridos, bem como revelam limitações de aprendizagem. Por exemplo, na AT1 (Quadro 4) – envolve a dimensão do conhecimento Efetivo/Factual combinada com o processo cognitivo Lembrar – foi proposto que os estudantes, a partir de 7 afirmativas, escrevessem um comentário de modo a expor o conhecimento sobre a MQ que possuía.

Quadro 4: AT1 - “Limites entre a Física Clássica e a MQ”

Considere as seguintes afirmações:

1. A Mecânica Quântica estuda a Física de objetos muito pequenos.
2. As partículas são ondas, e vice-versa.
3. Tudo que podemos saber são probabilidades.
4. A medição determina a realidade.
5. As correlações quânticas não são locais.
6. A Física quântica é real.
7. É possível encontrar a Física quântica no dia-a-dia.

O que você pode inferir sobre essas afirmações?

Escreva no mínimo 10 linhas um comentário que perpassasse as 7 afirmações.

- Fragmentos de respostas:

⁷ Resguardando a identidade dos sujeitos, para fazer referência às suas respostas, os nomes são fictícios.

A mecânica quântica trata de fenômenos que desafiam nosso senso comum, e nessa perspectiva a realidade... os fenômenos acontecem numa escala subatômica... Um fato que intriga bastante por exemplo é o experimento dupla fenda... e o próprio ato de medir interfere no fenômeno [...] (Rick)

[...] A mecânica quântica estuda fenômenos relacionados a partículas muito pequenas, onde essas partículas são pequenas ondas que não podem ser vistas a olho nu [...] (Lorena)

Como resultado, os estudantes não reconheciam, nem se recordaram de conceitos da MQ que deveriam ter sido apreendidos em outros momentos. Dos fragmentos, temos que Rick apresenta familiaridade, em grau superficial, com características mais básicas da teoria quântica. Enquanto, Lorena, conforme palavras usadas, repete as afirmações da atividade e comete equívocos conceituais. É provável que o contato prévio com a teoria em outras disciplinas (em Física Moderna, por exemplo) e espaços sociais não tenha sido suficiente para internalizar/fixar conteúdos importantes relacionados a MQ, como o conhecimento da dualidade onda-partícula ou problema da medida.

Na dimensão do conhecimento Conceitual, conforme já indicado, houve maior concentração de atividades. Através destas, esperávamos que os estudantes estabelecessem a inter-relação dos elementos básicos da teoria quântica com o contexto mais elaborado a partir da discussão do argumento de EPR fazendo as devidas conexões para sinalizar compreensão do emaranhamento quântico e não-localidade. Para verificar essas inter-relações, exemplificaremos a AT2 (Quadro 5), correspondente a designação de leitura dos textos de Einstein *et al.*, (1935) e Schrödinger (1935) que explora o nível de cognição Analisar.

Quadro 5: AT2 “Guia de leitura do texto”

A história da MQ é repleta de personagens, problemas e novas descobertas que causaram certo “alvorço” na Física. Te convido a saber mais sobre esse contexto. Leia os textos EPR (1935) e Schrödinger (1935) e responda respectivamente:

- a) De que trata o texto? Qual a problemática apresentada?
- b) O que os autores falam sobre o tema em questão? Como responde ao problema levantado? Que posição assume? Que ideia defende?
- b) O texto apresenta uma leitura fácil ou difícil? Em comparação com os textos comuns de livros didáticos, você acha o texto mais interessante ou tanto faz? Por que?
- d) Escreva suas dúvidas ou aquilo que não entendeu ao ler o texto. Há alguma coisa a mais que você gostaria de saber sobre o assunto e que o texto não detalha ou não explica o suficiente?

- Fragmentos de respostas:

[...] os autores (EPR) assumem uma postura conservadora do ponto de vista da não aceitação da nova teoria por a impossibilidade de determinação... textos como esse não tem o menor interesse em aproximar-se do leitor comum [...] Existem várias coisas que não entendi no texto de Schrödinger, relacionadas ao contexto da discussão do tema e eu gostaria de saber um pouco mais [...] (Leo)

O texto trata de uma discussão acerca das implicações da teoria quântica sobre a realidade física, é perceptível inicialmente dois problemas: a descrição da realidade dada pela função de onda na mecânica quântica não é completa, ou estas duas quantidades não podem ter realidade simultânea. O texto aparenta uma leitura fácil... mostra os embates que foram travados na época [...] Para Schrödinger a rejeição do realismo tem consequências lógicas... o valor medido deve determinar a realidade... O texto apresenta uma leitura um tanto complexa..., no entanto foi satisfatório em termos de conhecimento. (Rick)

A ideia central do texto é clara e objetiva, mas no que diz respeito ao tema específico que envolve a Mecânica Quântica, torna-se complicado para quem não tem familiaridade com a mesma. A linguagem específica e avançada faz o leitor pensar e refletir necessitando de uma adaptação para ser aplicada em livros didáticos, justamente pelo caráter conceitual e matemático que a Mecânica Quântica apresenta. Na abordagem específica tive algumas dúvidas a respeito de alguns conceitos como: grau de liberdade e o caráter quântico da função de onda [...] (Rodrigo)

Os estudantes foram orientados a responder a AT2 interpretando as informações presentes nos textos de modo a organizar suas ideias seguindo os questionamentos. De acordo com os fragmentos destacados, os estudantes sinalizam suas dificuldades no processo interpretativo e apresentam respostas bastante limitadas, não avançam em seus escritos e não desenvolvem/aperfeiçoam a competência de interpretação de textos científicos. Apesar disso, temos indícios de que o contexto histórico, as questões abertas e a busca por estabelecer um processo dinâmico de aprendizagem possuem potencial para estimular o interesse dos estudantes pela história da MQ – nas falas dos estudantes percebemos, apesar das dificuldades enfrentadas, o esforço em responder os questionamentos.

Os resultados refletem, embora a leitura de textos com termos desconhecidos tenham criado dificuldades de compreensão, o que afirma Almeida e Queiroz (1997, p. 67), “não impede que eles se manifestem motivados pelo texto, se a leitura for organizada como uma atividade que lhes pareça significativa”. Ao passo que liam os textos, indiciavam entender o processo de construção do conhecimento científico da MQ – exemplo, fala de Rick – e reconheciam sua falta de familiaridade com as temáticas – fala de Rodrigo. Semelhantemente, ocorre nas atividades AT5 e AT7.

Quadro 6: AT5 “Leitura do texto Bell (1964)”

Após a leitura do texto de Bell (1964), responda as questões que segue:

- a) O que você entendeu do texto Bell? Quais os argumentos principais apresentados pelo autor? É um texto de difícil compreensão?
- b) Há algum ponto que você gostaria de saber ou questionar sobre o assunto, que o texto não detalha ou não explica?
- c) Para um estado ser não-local é preciso ter emaranhamento, já que é simples construir um modelo de variáveis ocultas local a partir de um estado separável. Por outro lado, conhecemos a existência de estados emaranhados que admitem um modelo de variáveis ocultas, como explicar essa situação? Como abordar esse problema?
- d) Acerca de estados emaranhados considere essas duas hipóteses:
 - (1) A função de onda não nos fornece uma descrição completa do sistema;
 - (2) Quando dois operadores não comutam, as duas quantidades Físicas relacionadas a eles não apresentam realidade Física simultaneamente.

Quais consequências são geradas se você considerar sendo a hipótese (1) falsa? Sendo a hipótese (1) falsa a hipótese (2) permanece verdadeira? Explique

- Fragmentos de respostas:

[...] a exigência da localidade tornava os resultados estatísticos incompatíveis. No entanto, foi construído uma interpretação de “variável oculta”, que leva em consideração a ideia de não-localidade... não entendi o argumento em torno da matemática [...] (Rodrigo)

O texto aborda a localidade de uma teoria que não é completa, por não ter a capacidade de prever novos incrementos [...] Se a função de onda for considerada completa, não haverá novas hipóteses para implementar a teoria e a Mecânica Quântica terá seu objetivo cumprido. (Joaquim)

O autor tenta explicar a variável oculta da mecânica quântica através de artifícios como o exemplo defendido por Bohm... Se a medição do componente $\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{a}$, onde \vec{a} é algum vetor unitário, produz o valor +1 então, de acordo com a mecânica quântica, a medição de $\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{a}$ deve produzir o valor -1 e vice-versa. [...] o resultado de cada medição individual é determinado de uma variável extra, pois o valor dessa variável é desconhecido em instantes iniciais (Leo)

O esperado era que os estudantes discorressem sobre a teoria de variáveis ocultas, sobre as alterações quanto ao pensamento físico e a avaliação da natureza dos sistemas quânticos evidenciando compreensão de como o ato de medir um sistema quântico altera os resultados esperados. No entanto, conforme exemplificado no Quadro 6, os estudantes Rodrigo e Leo continuaram sinalizando fragilidades na interpretação dos textos e, respectivamente, no entendimento dos conceitos quânticos abordados. O fragmento da escrita de Joaquim, revela erros conceituais e interpretativos.

O mesmo foi percebido na atividade AT7 referente a leitura do texto de Aspect *et al.* (1982). Quando perguntado “Qual é a ideia mais importante que o autor pretende explicar com relação ao tema desse texto?”, os estudantes respondiam algo semelhante a Lorena: “*Com esse experimento, as desigualdades de Bell tornaram-se possível de teste salientando um novo olhar sobre a MQ. É necessário desvincular-se da concepção clássica para entender a quântica*”.

Em sua totalidade, as respostas não apresentavam profundidade, nem indícios de compreensão conceitual. Quando questionados, especificamente, sobre o experimento ou sobre o aspecto não-local da teoria – característica fundamental dos sistemas emaranhados –, os estudantes não conseguiam responder satisfatoriamente. A falta do conhecimento conceitual prévio e seu desenvolvimento durante a aplicação da proposta implicou na sutileza dos processos dialógicos, seja por insegurança em suas interpretações ou por dúvidas não esclarecidas. Enquanto, um estudante demonstra identificação pessoal com a temática e um gosto pelas leituras e discussões, outro demonstra seu “desespero” por não ter uma compreensão imediata dos textos, embora reconheça sua falta de dedicação ao processo de leitura e interpretação.

Em síntese, ainda que reconheçamos que a leitura em si não favorece o aprendizado de conceitos físicos, assim como a prática de leituras no ensino de física não é usual, consideramos que se utilizada como ferramenta didática pode contribuir como formadora de sentidos dos conceitos físicos para os estudantes. Dessa forma, o que esperávamos – não alcançado completamente –, com a leitura dos 4 textos selecionados mediados por atividades (AT2, AT5 e AT7), era que os estudantes analisassem o processo de construção do conhecimento científico da MQ conectando-os aos conhecimentos básicos para chegar a compreender o que é o emaranhamento quântico e a não-localidade.

Os resultados obtidos evidenciam que, contrariamente ao que afirma Montenegro (2005), a inclusão da leitura de textos de cientistas – pelo menos em nosso contexto – não facilitou o processo de compreensão conceitual. O contato com a MQ através da HFC foi garantido, bem como a percepção do processo de construção do conhecimento e dificuldades enfrentadas pelos cientistas, porém não houve avanço conceitual. Ficou aparente o abalo na concepção de alguns estudantes que pareceram ter adquirido consciência de que na ciência, não há verdades absolutas e imutáveis. A discussão da controvérsia sobre a (in)completude da MQ parece desestruturar essa visão. Embora as discussões não tivessem substância, ficou evidente o apego ao determinismo.

Em consequência, não foi suficiente o uso de HFC para aprender sobre MQ. Com essas atividades reconhecemos que é pré-requisito para a compreensão da teoria quântica a compreensão de uma interpretação (a ortodoxa, por exemplo) sem a qual a abordagem de determinados conceitos

fica sem sustentação – aspecto este que havia sido salientado por Greca (2000, p.21) “é indispensável que os estudantes aprendam os conceitos básicos em uma interpretação”. Ou seja, a contextualização histórica sobre o argumento de EPR poderá ser melhor compreendida quando alicerçada em uma interpretação da teoria.

Outro incentivo para uma participação mais ativa dos estudantes foi mobilizado através do uso de analogias em sala de aula. Mediados por questionamentos, os estudantes eram conduzidos a demonstrar compreensão de conceitos quânticos a partir de uma situação nova. A atividade AT3 conduzia os estudantes a demonstrar abstração através de uma história que envolvia o curioso comportamento de animais em pares encerrados em uma jaula circular e opaca. Nesse caso era explorado a compreensão dos estudantes do paradoxo EPR com foco em delinear inicialmente o emaranhamento quântico. Na mesma dimensão de conhecimento/processo cognitivo, a AT6 explora as desigualdades de Bell e a teoria de variáveis ocultas ao incentivar a abstração através de um raciocínio sobre a teoria dos conjuntos. Apesar do esforço por parte dos estudantes e mediação do professor, foi muito sutil o estabelecimento de paralelos entre analogias e os conceitos quânticos.

A última dimensão do conhecimento, contemplada nas atividades, foi a Procedimental/Procedural que tem em sua essência a função de promover a utilização de métodos, critérios, algoritmos e técnicas sobre determinado conteúdo com habilidade e percepção de como e quando usar um procedimento específico para chegar às respostas ou desenvolver certa atividade. Nessa dimensão, a atividade AT4, exploramos características de sistemas quânticos e o emaranhamento através do interferômetro de Mach-Zehnder por meio de simulação computacional. Tencionamos Avaliar a compreensão dos estudantes sobre o que é representado no interferômetro. Um roteiro com instruções para manipular a simulação é fornecido (NETTO, 2015). Todos os estudantes tiveram dificuldade em manipulá-lo, uns por não terem familiaridade com o aplicativo, outros por questões de não conseguirem avaliar fisicamente o que estava acontecendo. Por exemplo, Alice aponta: “[...] *esperava haver detecção em apenas dois detectores. Com a configuração de emaranhamento, não esperava tais resultados, seria mais plausível os resultados no item 4*”.

Por fim, ainda na dimensão Procedimental/Procedural a atividade AT8 explora o processo cognitivo Criar, através da proposta de elaboração de plano de aula (Quadro 7). A habilidade Criar envolve a noção de reunir dados para formar algo novo ou reconhecer os componentes de uma nova estrutura e modelo coerente, a partir do conhecimento e habilidades previamente adquiridos exigindo do estudante o envolvimento de todas as dimensões do processo cognitivo. Os estudantes precisariam articular seu conhecimento sobre MQ através da reflexão sobre a transposição didática.

Quadro 7: AT8 “Recontextualização”

Elabore um plano de aula para o ensino médio.
Pense da seguinte forma: De que forma os textos lidos e a proposta didática vivenciada podem alicerçar uma aula para o ensino médio. Como abordar os assuntos que acabei de estudar? o que priorizar?

- Plano de aula – (Joaquim):

I. Dados de Identificação:

Professor (a):

Conteúdo: Mecânica Quântica

Série: 3º ano Ensino médio

II. Tema: Mecânica quântica (MQ)

III. Objetivos:

Objetivo geral: Compreensão conceitual, histórica e fenomenológica da problemática inicial do surgimento da teoria quântica no que diz respeito à completude da mesma.

Objetivos específicos: Visualizar o determinismo clássico e a problemática da quebra paradigmática que ocorreu no processo, introduzir o princípio de incerteza de Heisenberg, a ideia e importância da função de onda na mecânica quântica.

IV. Conteúdo: Contexto histórico (20 min)

V. Desenvolvimento do tema: Contextualização histórica

VI. Recursos didáticos: PowerPoint

VII. Avaliação: Avaliação processual.

Atividades: Perguntas problemas

VIII. Bibliografia:

Pode a descrição da Mecânica Quântica sobre a realidade física ser considerada completa? (A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, 1935).

Tópicos da física. Volume 3, Newton, Gualter, Helou editora Saraiva.

Essa atividade busca promover um momento de reflexão sobre etapas da prática docente com a elaboração de plano de aula para o ensino médio. Foi proposto pensar o processo de transposição didática observando as relações didático-pedagógicas e estratégias metodológicas para o ensino de MQ. Para tal, os estudantes foram instruídos a valorizar a contextualização histórica da proposta sobre o trabalho de Einstein *et al.* (1935) e temas afins. Queríamos observar as habilidades dos estudantes na elaboração de uma aula que envolvesse conceitos, aplicações e desenvolvimentos da teoria quântica.

Como resultado, foram apresentadas cinco miniaulas com tópicos da velha MQ, uma aula com o tema de “Borracha Quântica” e uma sobre a “Mecânica Quântica”. O quadro 7, exemplifica o plano de aula desta última. Através desse exemplo, vemos que o estudante Joaquim, não apresenta adequadamente indícios do que seria de fato realizado. Em geral, os resultados revelam que a esperada articulação conteúdo-estratégia-recurso não foi alcançada. Pôde-se elencar cinco tipos de equívocos recorrentes nos planos de aula, a saber: 1) dificuldades em estabelecer objetivos de ensino; 2) não há tempo de duração da aula definido; 3) limitação na apresentação das estratégias metodológicas que poderiam ser utilizadas; 4) erro na descrição e/ou do processo de avaliação a ser adotado; 5) consulta de referências, para subsidiar a aula, limitadas ou não seguras.

A elaboração de um plano de aula sobre a presente temática, segundo a TBR, implica em atividade com maior nível de complexidade. O uso da TBR apresenta a vantagem no contexto educacional de oferecer a base para o desenvolvimento de instrumentos de avaliação e utilização de estratégias diferenciadas para facilitar, avaliar e estimular o desempenho dos estudantes em diferentes níveis de aquisição de conhecimento; e estimular os educadores a auxiliarem seus discentes, de forma estruturada e consciente, adquirirem competências específicas a partir da percepção da necessidade de dominar habilidades mais simples (fatos) para, posteriormente, dominar as mais complexas (conceitos). Logo, essa atividade deve ser melhor pensada.

É no contexto de um ensino focado na HFC sobre MQ para promover uma visão da ciência enquanto construção histórica e cultural que percebemos que as contribuições esperadas esbarrem na falta do hábito e o gosto pela leitura por parte dos estudantes, bem como na ausência de conhecimento em MQ para desenvolver competências de interpretação e análise textuais – aspectos que trazem dificuldades ao processo cognitivo.

Reflexão sobre a ação e conclusões

A definição clara e estruturada dos objetivos instrucionais, considerando a aquisição de conhecimento, de competências e habilidades adequados ao perfil profissional a ser formado direciona o processo de ensino para a escolha de estratégias, métodos, delimitação do conteúdo específico, instrumentos de avaliação e, por consequência, pode resultar em aprendizagem efetiva e duradoura. A seguir, discutiremos as possíveis razões para as limitações observadas na execução das atividades propostas.

No quadro 8, alinhamos o processo cognitivo da TBR com resultados da implementação da proposta ao desempenho e competência desejada para que os estudantes fossem considerados conhecedores de determinados assuntos. Esse quadro está ligado a um resultado intencional diretamente relacionado ao conteúdo e à forma como ele deverá ser aplicado. Ao estruturá-lo, diferenciamos para cada categoria, o que estaria relacionado à aquisição do conhecimento, desenvolvimento de habilidade e competência.

Quadro 8: Processo cognitivo observado nos resultados da implementação

Taxonomia de Bloom Revisada	<i>Conhecimento</i>	Lembrar	Os conceitos mais utilizados e mais importantes para compreensão histórica não foram, anteriormente, fixados.
		Entender	Apresentam dificuldades para entender conceitos teóricos referentes a fundamentos da MQ; não têm dificuldades quando se trata de entender a contextualização histórica; métodos diversificados auxiliariam à superação das dificuldades, a busca contínua por qualificação facilita o entendimento em sala de aula.
	<i>Competência</i>	Aplicar	Há uma deficiência em colocar o conhecimento em uma situação nova, facilitado em sala de aula através da mediação do professor.
		Analisar	São capazes de analisar e interpretar contextos, mas há limitações enquanto a compreensão conceitual; o incentivo a análise proporciona novas oportunidades para a aprendizagem, mas precisa ser melhor pensada na construção da proposta didática.
	<i>Habilidade</i>	Avaliar	Não conseguem avaliar situações baseados nos conhecimentos que devem ser adquiridos, mas reconhecem que se amplia a visão do conteúdo e proporciona oportunidades de aprendizagem.
		Criar	Incentivo a novas posturas e estimula a criatividade, mas é preciso um conhecimento mais consistente da MQ.

Olhar para o método de ensino nos leva a reflexão de que tão importante quanto às estratégias didáticas para o ensino – as quais o professor deliberadamente as planejou para que o estudante construa e mobilize conhecimentos de forma mais autônoma para a obtenção de objetivos educacionais e para os quais ele tem relativo controle – são as relações conceito/conteúdo, as articulações entre os recursos adotados, o papel do próprio professor e as ações dos estudantes no processo de ensino-aprendizagem. Sobre esses aspectos, destacamos algumas conclusões.

a) Limitações ao responder atividades

Os métodos de ensino foram pesados para facilitar a aprendizagem e contribuir para a compreensão histórico-conceitual da MQ, dos resultados obtidos podemos afirmar que estes foram alcançados parcialmente. Os estudantes compreenderam o contexto histórico, mas apresentaram dificuldade na compreensão conceitual e deficiência da aplicação da teoria na prática. Foi eficaz a contextualização histórica, mas é preciso maior comprometimento com o processo de aprendizagem.

Esses aspectos são reforçados, por exemplo, ao olhar para a classificação das atividades apresentadas via TBR. A ordenação hierárquica de complexidade e abstração auxilia na percepção dos domínios superiores à simples memorização que os estudantes devem desenvolver de modo que atingir uma categoria significa dominar as antecessoras, podendo ocorrer entrelace. Para que os estudantes obtivessem sucesso no processo de ensino-aprendizagem, eles precisariam interpretar o assunto e realizar uma extrapolação para além do contexto abordado aplicando em uma situação nova. No entanto, esse resultado em sua totalidade não foi atingido. A concentração das atividades em níveis de maior complexidade configurou-se aspecto limitador de sucesso.

Em termos dos pressupostos teóricos da ZDP de Vygotsky, não houve uma adequada valorização das capacidades dos estudantes, não houve o estabelecimento de condições para o desenvolvimento cognitivo da compreensão dos conceitos quânticos. Nas atividades referentes à leitura e interpretação, por exemplo, observamos cópias na íntegra de trechos dos textos, nos quais os estudantes se limitavam a meras repetições (se desejar, para verificar, volte ao quadro 5 e 6).

Em discussões posteriores à designação das atividades – mediação do professor em sala – os estudantes expressaram suas dificuldades quanto a compreensão científica dos textos, manipulação do simulador e quanto a não compreensão de conceitos fundamentais necessários para o entendimento do emaranhamento quântico. Em geral, pouco respondiam os questionamentos levantados e quando o faziam, por vezes, reproduziam falas dos próprios recursos utilizados (slide, vídeo, imagem) ou dos textos lidos.

Portanto, se por um lado, é ineficaz priorizar os processos cognitivos de conhecimento, em que predominava a memorização, também é deficitário exigir habilidades cognitivas mais complexas, ainda que em contextos interdisciplinares. Talvez, a valorização de processos cognitivos intermediários, como Entender e Aplicar sejam os mais viáveis para os processos formativos introdutórios do ensino da MQ.

Para além desses aspectos, ressaltamos outras duas limitações. A primeira é a relação entre o tempo estimado *a priori* para desenvolver a proposta e o tempo real. Conforme mencionados eram previstos 8 encontros de 1h30 cada, no entanto, efetivamente não tínhamos este tempo. Embora mantida a previsão de 8 encontros, chegamos a ter encontros de duração de apenas 1h. As razões são diversas, seja atraso para começar as aulas ou falta de pontualidade dos estudantes, e resultam em dificuldades como menor tempo para exposição do professor e, conseqüentemente, prejuízo nas interações. Estas são situações que acontecem com frequência nas instituições e os pesquisadores devem levar em conta ao elaborar propostas inovadoras.

Por último, a segunda limitação crucial para o sucesso de qualquer intervenção didática é a falta de dedicação dos estudantes às suas atividades. As atividades propostas são marcadas pela exigência de um ritmo de estudo intenso e do desenvolvimento de uma postura mais autônoma. No entanto, os estudantes ainda não desenvolveram este perfil ou escolhem qual disciplina merece mais atenção/dedicação que outra. Nesse sentido, cabe aos professores-pesquisadores buscarem meios estratégicos para maior incentivo na realização das atividades.

b) O papel do professor-pesquisador

O movimento de refletir sobre a ação é importante por se caracterizar como uma contraposição à visão do professor como simples reprodutor e executor de conhecimentos, e a notoriedade do papel de pesquisador, sobre sua prática. Segundo Geraldí *et al.* (2003), o professor enquanto pesquisador não deve concentrar-se apenas na produção de conhecimento a partir dos problemas vividos no cotidiano da sala de aula, por meio da prática crítica-reflexiva deve desenvolver reflexão em diferentes níveis: ensino usual, epistemologia dos conteúdos, esfera didática, âmbito cognitivo e o pensamento do estudante. Trata-se de estabelecer um processo em que o professor se indague sobre suas ações e que se capacite para contribuir com a elaboração de um processo de ensino-aprendizagem que reflita diretamente na prática pedagógica requerendo novas competências e habilidades a partir das demandas que surgem.

A prática pedagógica deixa de ser baseada na figura do professor transmissor de informações e estudante receptor. Um novo paradigma baseado na reflexão sobre a ação passa a constituir grande desafio pedagógico, exigindo o envolvimento entre professor e estudante na construção do

conhecimento científico. O tratamento que o professor dá ao conteúdo, assim como as metodologias e os objetivos de ensino adotados importam nas situações de aprendizagem.

No curso piloto, todo o planejamento foi pensado em compor estrutura voltada para problematização e o processo dialógico, todavia não foi suficiente para gerar efetivas situações de aprendizagem nas quais os estudantes dessem sentido ao conhecimento, através da contextualização e personalização do saber. Na implementação da proposta foi priorizado a quantidade de conteúdo focando nas aulas expositivas ainda que envolvesse métodos de ensino combinados com atividades diferenciadas voltadas a motivação.

Durante os processos dialógicos que se tentou estabelecer, o professor-pesquisador seguiu um modelo de dar as respostas prontas na tentativa de diminuir as dificuldades de compreensão do conteúdo exposto. Os estudantes pouco ativos no processo acabaram por limitar suas ações, e, portanto, a qualidade da produção de conhecimentos, ainda que tendo devido acesso aos modelos explicativos e/ou esquemas teóricos, e a eficácia da aprendizagem foram comprometidos.

Neste contexto, com maior consciência dos movimentos didáticos, chegamos à conclusão da necessidade de reestruturação da proposta didática admitindo preocupação de aproximar os objetivos do curso aos anseios e interesses dos estudantes percebendo a função do professor para além da veiculação do conhecimento junto ao estudante em sala de aula. Em aplicações futuras, o papel do professor será o de buscar meios para oferecer um conjunto situações de ensino nas quais não se dê respostas prontas, mesmo que detenha a informação exata, oferecendo novas perguntas no seu lugar. Estas situações deveram levar os estudantes a buscar a informação com maior orientação e acompanhamento, de modo a aperfeiçoar as sequências de atividades e a ação autônoma do mesmo.

Considerações finais

Admitindo a complexidade da MQ esse contato inicial através da abordagem contextualizada para os futuros professores de física foi importante. Os resultados da versão piloto apresentam contribuições no sentido de métodos de ensino: 1) incentivou discussões condizentes com o uso didático da HFC no ensino da MQ estimulando a participação dos estudantes além de se explorar os mais diversos recursos didáticos e atividades a serem propostas; 2) o uso didático da HFC, ao passo que é fator motivacional, é também, facilitador da construção conceitual e cultural ao criar condições para que os estudantes compreendam os conteúdos historicamente produzidos; 3) proporcionou conhecimento quanto aos processos que devem ser observados na elaboração de qualquer proposta didática, bem como as interpelações necessárias entre o referencial teórico e metodológicos que possibilite o desenvolvimento dos processos cognitivos; e 4) chama atenção de pesquisadores da área de ensino de física para os processos de elaboração e/ou avaliação segundo a categorização da TBR uma técnica em potencial para tal.

No entanto, os professores em formação, mesmo com a implementação do curso, apresentam lacunas importantes em relação a aspectos conceituais básicos de MQ. Essas lacunas são decorrentes tanto de limitações do processo ensino-aprendizagem, quanto da elaboração da própria proposta didática. Sobre a análise das atividades propostas mostrou uma concentração nas categorias mais avançadas da TBR. Aspecto que indica uma priorização em itens que requer processos cognitivos mais elevados dos estudantes em relação aos tópicos trabalhados, o que conforme já discutido não foi alcançado.

Os conceitos como são apresentados nos textos, o nível de abstração e a não familiaridade com o conteúdo foram fatores geradores de dificuldades. Não foi suficiente a inserção de atividades, simulações, vídeos ou ilustrações de aplicações para compreensão conceitual da teoria que foi limitada ou inexistente. Os estudantes não conseguiram dialogar acerca dos fenômenos apresentados.

No *feedback* realizado na última aula, dada a complexidade do tema (implicações físicas e filosóficas) tratado na proposta didática, chegou-se à conclusão da necessidade de um texto secundário que aborde o contexto histórico em questão. Como exemplo, devido a extensão do artigo de Schrödinger (1935), texto 2, a escrita de uma narrativa ou material didático específico que contemple o conteúdo associado através de trechos para suplantar discussões pode resultar em melhores rendimentos.

Entendemos, portanto, que o processo de transmissão e recepção do conhecimento é um processo muito mais complexo do que se imagina. É fato que para pensar o ensino de qualquer conteúdo, não basta pensar *o que* ensinar, mas também *o como*, buscando atender às diferenças e peculiaridades da maneira como cada estudante aprende. A aprendizagem não acontece de uma hora para a outra, existe uma sequência, uma evolução dos fatos, de acordo com a maturidade do indivíduo que o está recebendo. O estudante precisa desenvolver um repertório para o avanço de aprendizagem.

Diante dessas considerações, frente aos resultados obtidos, destacamos a necessidade de uma reestruturação da proposta mantendo o enfoque contextualizado, porém, acrescentando a abordagem dos conceitos fundamentais. Além de construir um planejamento com base nas dimensões da TBR com menor grau de complexidade alinhando-as às atividades de avaliação. Salienta-se que no planejamento não há problema algum na ordem dos objetivos inseridos na dimensão dos processos cognitivos, entretanto, a ordem na dimensão de conhecimentos deve ser respeitada de forma hierárquica e almejando um maior controle do processo de aprendizagem.

Por fim, esse estudo piloto é um ponto de partida sugestivo para a tomada de decisões dos professores do nível superior, que podem priorizar novas formas de atender as necessidades dos futuros professores quanto ao estudo da MQ. Aqui, damos visibilidade às práticas de reorientação curricular que estão sendo desenvolvidas na área de ensino da MQ, favorecendo a reflexão docente com relação tanto às potencialidades como às alternativas de minimização das dificuldades vivenciadas pelas intervenções curriculares realizadas; e sinalizando possíveis encaminhamentos para a aprendizagem.

É perspectiva de continuação da presente pesquisa um estudo para reestruturação da proposta didática retomando a quarta fase da Engenharia Didática de Artigue, na qual buscaremos meios de superação das dificuldades oriundas dos resultados do projeto piloto apresentado.

Referências

- AKARSU, B. **Einstein's redundant triumph "quantum physics": An extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college.** Lat. Am. J. Phys. Educ.,3(2), 273-285, 2010.
- ALLCHIN, D. **Teaching the nature of science: Perspectives and resources.** Saint Paul: SHiPS Education Press, Saint Paul, MN, USA, 2013.
- ALMEIDA, M. J. P. M.; QUEIROZ, E. C. L. **Divulgação científica e conhecimento escolar: um ensaio com adultos.** Cadernos CEDES, Campinas, n. 41, p. 62-68, 1997.
- ANDERSON, L. W.; KRATHWOHL, D. R.; BLOOM, B. S. **A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives.** [S.l.]: Allyn & Bacon, 2001.
- ARTIGUE, M. **Didactical engineering as a framework for the conception of teaching products.** In: BIEHLER, R. E. A. (Ed.). *Didactics of Mathematics as a Scientific Discipline.* Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1994. p.27-39.

ARTIGUE, M. **Perspectives on Design Research: The Case of Didactical Engineering** Springer Science+Business Media Dordrecht, 2015 (467-496)

ASPECT, A., DALIBARD, J. e ROGER, G. **Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers.** Physical Review Letters, 49(25), 1804–1807. (1982). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1804>

BELL, J. S. **On the Einstein Podolsky Rosen Paradox,** Physics 1, 195–200 (1964).

BRASIL. Ministério da Educação. **Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação Inicial e Continuada dos Profissionais do Magistério da Educação Básica.** Brasília: Parecer CNE/CP 2/2015, de 9 de junho de 2015. <http://portal.mec.gov.br/docman/agosto-2017-pdf/70431-res-cne-cp-002-03072015-pdf/file>

BRASIL. Ministério da Educação. **Diretrizes Curriculares para os Cursos de Bacharelado e Licenciatura em Física.** Brasília: Parecer nº CNE/CES nº 1304/2001 de 03 de abril de 2001.

BRASIL. Ministério da Educação. Resolução CNE/CES 9/2002. **Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Bacharelado e Licenciatura Física.** Brasília: MEC, 2002. <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES09-2002.pdf>

CATALOGLU, E. e ROBINETT, R. W. **Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career,** Am. J. Phys. 70, 238, 2002.

COLL, C.; POZO, J. I.; SARABIA, B. et al. **Los contenidos en la reforma: enseñanza y aprendizaje de conceptos, procedimientos y actitudes.** Buenos Aires, 1992.

CONRADO, D. M.; NUNES-NETO, N. F. (Orgs.). **Questões Sociocientíficas: fundamentos, propostas de ensino e perspectivas para ações sociopolíticas.** Salvador: EDUFBA, 2018.

CUESTA, Y. J. **Estado del arte: tendencias en la enseñanza de la física cuántica entre 1986 y 2016.** TED: N° 44, segundo semestre de 2018, p. 147-166.

DELIZOICOV, N. C.; SLOGO, I. I. P.; HOFFMANN, M. B. **História e Filosofia da Ciência e Formação de Professores: A Proposição dos Cursos de Licenciatura em Ciências Biológicas do Sul do Brasil.** X Congresso Nacional de Educação - EDUCERE; SIRSSE, PUC-PR, Curitiba, 2011.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?** Physical Review, v. 47, p. 777-780, 1935.

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas.** Rio de Janeiro: Campus, 1979.

FERRAZ, A. P. C. M. e BELHOT, R. V. **Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais.** Gestão & Produção. [online]. v.17, n.2, p. 421-431, 2010.

FORATO, T. C. M. A filosofia mística e a doutrina newtoniana: uma discussão historiográfica. **Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia,** v. 1, n. 3, p. 29-53, 2008.

FREIRE JR., O. **Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982)**. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37(4), 577–616. (2006) <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2005.12.003>.

GERALDI, C. M.; FIORENTINI, D.; PEREIRA, E. M. A. **Professor como pesquisador: o enfoque da pesquisa-ação na prática docente**. *Cartografias do trabalho docente*. Campinas: Mercado das Letras, 2003.

GIL-PÉREZ, D. MONTORO, I. F.; ALIS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não-deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GRECA, I. M. **Construindo significados em mecânica quântica: resultados de uma proposta didática aplicada a estudantes de física geral**. 2000. Tese (Doutorado em Física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.

GRECA, I. M.; FREIRE, O. **Meeting the Challenge: Quantum Physics in Introductory Physics Courses**. In: MATTHEWS, M. R. (Ed.) *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. Springer, v.1; pp. 183 – 209, 2014.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. **Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica Introdutória**. *Investigações em Ensino de Ciências – V6(1)*, pp. 29-56, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 8. ed. 4 volumes. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009.

HEERING, P.; HÖTTECKE, D. **Historical-Investigative Approaches in Science Teaching**. In: MATTHEWS, M. R. *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*. New York: Springer, 2014. p.1473-502.

HODSON, D. **Teaching and learning about science: Language, theories, methods, history, traditions and values**. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2009.

HOLTON, G. What historians of science and science educators can do for one another? **Science Education**, v. 12, n. 7, p. 603-616, oct. 2003.

JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. **Student difficulties in learning quantum mechanics**. *Int. J. Sci. Educ.*, 20:4, 427-446, 1998.

KOHNLE, A., BOZHINOVA, I., BROWNE, D., EVERITT, M., FOMINS, A., KOK, P., KULAITIS, G., PROKOPAS, M., RAINE, D. AND SWINBANK, E. **A new introductory quantum mechanics curriculum**. *Eur. J. Phys.* 35, 015001 (2014).

KRAGH, H. **A sense of history: history of science and the teaching of introductory quantum theory**. *Science & Education*, Dordrecht, v. 1, p. 349-363, 1992.

KRAGH, H. *An introduction to the historiography of science*. Cambridge: New York, 1989.

KRATHWOHL, D. R. **A revision of bloom's taxonomy: An overview**. *Theory into practice*, Taylor & Francis, v. 41, n. 4, p. 212–218, 2002.

KRIJTENBURG-LEWERISSA, K., POL, H. J., BRINKMAN, A. & VAN JOOLINGEN, W. R. **Insights into Teaching Quantum Mechanics in Secondary and Lower Undergraduate Education.** Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 13 010109 (2017).

LIMA, L. S.; RICARDO, E. C. **O Ensino da Mecânica Quântica no nível médio por meio da abstração científica presente na interface Física-Literatura.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 36, n. 1, p. 8-54, abr. 2019.

LOMBARDI, O. J. La Pertinencia de la Historia en la Enseñanza de Ciencias: argumentos y contraargumentos. **Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas**, Barcelona, v. 15, n. 3, p. 343-349, 1997.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em Educação: Abordagens Qualitativas.** São Paulo: EPU, 1986.

MANNILA, K.; KOPONEN, I. T.; NISKANEN, J. A. **Building a picture of students' conceptions of wave- and particle-like properties of quantum entities.** European Journal of Physics, v.23, p. 45-53, 2002.

MARTINS, R. A. Introdução. **A história das ciências e seus usos na educação.** Pp. xxi-xxxiv, in: SILVA, Cibelle Celestino (ed.). Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MATTHEWS, M. **História, filosofia e ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação.** Cad. Cat. Ens. Fís., v. 12, n. 3: p. 164-214, dez. 1995.

MATTHEWS, M. R. **Science Teaching - The Role of History and Philosophy of Science.** New York: Routledge, 1994.

MONTENEGRO, A. G. P. M. **A leitura de textos originais de Faraday por alunos do Ensino Fundamental e Médio.** 2005. 98f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MOREIRA, M.A.; OSTERMANN, F. **Sobre o ensino do método científico.** Caderno Catarinense de Ensino de Física, 10, 2, 106-117; 1993.

NETTO, J. S. **Complementaridade onda-partícula e emaranhamento quântico na formação de professores de Física segundo a perspectiva sociocultural.** (2015). 311 f. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. **Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder.** Revista brasileira de ensino de física. São Paulo. Vol. 27, n. 2 (abr./jun. 2005), p. 193-203, 2005.

PANTOJA, G. F., MOREIRA, M. A. E HERSCOVITZ, V. E., **Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de mecânica quântica no período de 1999 a 2009.** Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia 4, 1-34 (2011).

PEDUZZI; L. O. Q. **As concepções espontâneas, a resolução de problemas e a história e filosofia da ciência em um curso de mecânica.** Tese, Florianópolis: UFSC, 1998.

PEREIRA, A. P. e OSTERMANN, F. **Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente.** Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v.14, n.3, pp. 393-420, dez. 2009.

PRAIA, J.; GIL PÉREZ, D. E A. VILCHES (2007). **O papel da natureza da ciência na educação para a cidadania.** Ciência & Educação, 13, 2, 141-156.

ROCHA, C. R., HERSCOVITZ, V. E. & MOREIRA, M. A. **Uma revisão da literatura em publicações de 2010 a 2016 sobre o ensino de conceitos fundamentais de Mecânica Quântica.** Latin-American Journal of Physics Education, ISSN-e 1870-9095, Vol. 12, nº. 1, 2018.

ROCHA, S. M. P. T. **Integrando o mapa de conteúdos e o mapa de dependências a Taxonomia Revisada de Bloom.** Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, 2013.

SCHÖN, D. A. **Educando o Profissional Reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem.** Trad. Roberto Catal do Costa. Porto Alegre: Artmed, 2000, 256p.

SCHRÖDINGER, E. **Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.** Naturwissenschaften 23: pp.807-812; 823-828; 844-849 (1935).

SILVA, A. C., ALMEIDA, M. J. P. M., HALLACK, M. L. **Fragmentos do paradoxo EPR em um trecho de divulgação científica: uma pesquisa de cunho exploratório com ingressantes na universidade.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 32, n. 1, p. 53-75, abr. 2015.

SILVA, B. V. C. **História e filosofia da ciência como subsídio para elaborar estratégias didáticas em sala de aula: um relato de experiência em sala de aula.** Revista Ciência & Ideias. v. 3. n. 2. 2012.

SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de História e Filosofia das Ciências: subsídios para aplicação no Ensino.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006

SINARCAS, V. e SOLBES, J. **Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato.** *Enseñanza de las Ciencias*, 31(3), 9-25 (2013).

SOLBES, J.; TRAVER, M. **Resultados obtenidos introduciendo historia de la ciencia en las clases de Física y Química: mejora de la imagen de la ciencia y desarrollo de actitudes positivas.** *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 19, n. 1, p. 151-162, 2001.

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente.** São Paulo: Martins Fontes, 2007.

VYGOTSKY, L. S. **A formação social da mente: o desenvolvimento dos processos psicológicos superiores.** 3.ed. São Paulo: Martins Fontes, 1989.

VYGOTSKY, L. S. **Obras Escogidas Tomo II.** Madrid: Visor Distribuciones. 1994, 512 p.

VYGOTSKY, L. S. **Pensamento e Linguagem.** São Paulo: Editora Martins Fontes, 2008. 212 p.