

Uma revisão da literatura em publicações de 2010 a 2016 sobre o ensino de conceitos fundamentais de Mecânica Quântica



Carlos Raphael Rocha¹, Victoria Elnecave Herscovitz², Marco Antonio Moreira²

¹*Departamento de Física, Universidade do Estado de Santa Catarina, Rua Paulo Malschitzki, 200, Zona Industrial Norte, 89219-710, Joinville, SC, Brazil.*

²*Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Caixa Postal 15051, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.*

E-mail: carlos.rocha@udesc.br

(Recibido el 14 de junio de 2017, aceptado el 18 de diciembre 2017)

Resumo

Apresenta-se uma revisão da literatura acerca da produção sobre o ensino de Mecânica Quântica em artigos publicados de 2010 a 2016. Deu-se ênfase a artigos com foco em conceitos fundamentais da teoria quântica, tais como os de estado de sistema físico e de superposição linear de estados. Foram encontrados e analisados oitenta artigos posteriormente agrupados em cinco categorias: propostas pedagógicas; propostas didáticas implementadas; estudos sobre concepções de estudantes ou professores acerca de tópicos fundamentais de Mecânica Quântica; análise de material didático; estudos sobre formação continuada. O número elevado de trabalhos presentes na segunda e na terceira categoria aponta para uma tendência na pesquisa nesta área e mostra uma preocupação dos pesquisadores com a implementação das propostas didáticas e o estudo da compreensão e concepção dos estudantes acerca dos conceitos abordados. Quase metade dos trabalhos analisados tem relação direta ou indireta com o ensino de física moderna e contemporânea voltado para o nível secundário, indicando também que há expressivo interesse em pesquisas neste nível de ensino.

Palavras chave: Revisão da literatura, mecânica quântica, ensino médio.

Abstract

This paper presents a review of literature about academic production on the teaching of Quantum Mechanics in articles published between 2010 and 2016. The emphasis was on those focusing on fundamental concepts of quantum theory such as the state of a physical system and the linear superposition of states. Eighty articles were collected and analyzed and then organized into five categories: pedagogical proposals; implemented didactical proposals; studies on the students or teachers' conceptions on the basic topics of QM; analysis of didactical material; studies on continuing education. The high number of studies included in the second and third categories suggest a trend of research in this area, and it suggests the researchers' concern with the implementation of didactical proposals and with the studies on the students' comprehension and conceptions of the approached concepts. Less than half of the analyzed papers relate directly or indirectly to the teaching of modern and contemporary physics in secondary school, which seems to indicate interest in research in teaching at such level.

Keywords: Literature revision, quantum mechanics, high school teaching.

PACS: 01.40.Fk, 01.90.+g, 03.65.-w

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

A Mecânica Quântica (MQ), juntamente com a Teoria da Relatividade, alterou no século XX a visão e a compreensão sobre o mundo físico, causando uma revolução e um avanço no conhecimento sobre a Natureza sem precedentes. A teoria quântica fornece um excelente modelo para a abordagem do mundo microscópico atômico [1], bem como para a compreensão de vários fenômenos revelados por sistemas de maiores dimensões e como base para aplicações tecnológicas de grande impacto em setores os mais diversos, alguns próximos à Física e outros distantes dela. Áreas *Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 12, No. 1, March 2018*

como as das Comunicações, da Saúde e da Informação se amparam fortemente na MQ; lasers, semicondutores e supercondutores além de equipamentos médicos como os de tomografias, ressonância magnética e PET Scan, são apenas alguns exemplos de uso rotineiro na atualidade. O ensino em vários níveis de profundidade desta teoria, que é objeto de projetos e análises, então, é uma consequência natural e recomendada, que se reflete em publicações.

O presente trabalho tem como proposta uma revisão da literatura recente acerca de publicações envolvendo o ensino e a aprendizagem de conceitos fundamentais de MQ, especialmente no Ensino Médio (EM) ou com implicações

para este nível de ensino. Foram considerados artigos publicados a partir de 2010 e até 2016 nas principais revistas disponíveis no portal de periódicos da CAPES avaliadas em 2017 com conceitos A1, A2, B1 e B2 na área de Ensino de Física.

A escolha da MQ se deve, além de por seus sucessos, ao fato de ser considerada um instrumento de promoção da atualização curricular, de estar inserida nos currículos de Física de EM, mesmo com alguma dificuldade, e por fazer parte de linhas de pesquisa de diversos programas de pós-graduação em Ensino de Física, em tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC). Considerando-se, então, a inserção de tais tópicos no EM, é importante verificar quais as principais contribuições da pesquisa em ensino de física correspondentes, presentes na literatura.

Após uma breve análise de artigos de revisão anteriores encontrados na literatura, são apresentadas e comentadas publicações atuais, agrupadas em cinco categorias.

II. TRABALHOS ANTERIORES DE REVISÃO DA LITERATURA

Destacamos, na literatura, cinco trabalhos de revisão, relacionados ao ensino de conceitos de FMC, seja de MQ ou de outros temas, com análise de artigos publicados de 1970 a 2009.

Ostermann e Moreira [2] apresentam uma revisão de mais de 50 artigos sobre a introdução de FMC no EM desde 1970 e até o final do século passado. Os trabalhos foram classificados em seis grandes grupos, a saber: justificativas para a inserção de FMC no EM; questões metodológicas, epistemológicas e históricas referentes ao ensino de FMC; estratégias de ensino e currículos; concepções alternativas dos estudantes acerca de tópicos de FMC; temas de FMC apresentados como divulgação ou como bibliografia de consulta para professores do EM; propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem; livros didáticos de nível médio que inserem temas de FMC.

Os autores afirmam ter constatado uma maior concentração de publicações na forma de divulgação e de bibliografia de consulta para professores. Além disto, mencionam também que poucos trabalhos se referem a pesquisas sobre concepções alternativas dos estudantes acerca de tópicos de FMC e a resultados de propostas aplicadas em sala de aula. Nove trabalhos relativos ao ensino de MQ são citados por eles com aplicação em sala de aula e com resultados de aprendizagem, a maioria tratando de temas introduzidos junto à Velha Teoria Quântica, como o efeito fotoelétrico e a natureza quântica da luz. Os autores desta revisão consideram que o pequeno número de artigos relacionados a estudos sobre concepções alternativas e a propostas testadas em sala de aula deve incentivar a pesquisa nessa área. Mesmo salientando que este é um grande desafio, outro ainda é proposto: o de analisar quais tópicos sobre FMC devam ser ensinados nas escolas.

Em uma revisão específica sobre o ensino de MQ, Greca e Moreira [3] apresentam mais de 40 artigos atingindo cursos introdutórios (em nível médio e superior), publicados

de 1970 a 2000. Os trabalhos foram classificados em três grandes grupos: artigos sobre concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de MQ; trabalhos com críticas a cursos introdutórios de MQ; estudos contendo propostas de novas estratégias didáticas. Os autores observam que são poucos os artigos encontrados no primeiro grupo e que poucas propostas do terceiro grupo foram efetivamente implementadas, além de constatarem, também, um aumento no interesse por este tipo de pesquisa nos últimos anos do período analisado. Em suas considerações finais salientam que os trabalhos relacionados indicam que os estudantes não compreendem satisfatoriamente os conceitos da MQ, embora muitas das pesquisas realizadas não sejam conclusivas a respeito. Além disto assinalam que as abordagens tradicionais da MQ têm sido severamente criticadas sob vários ângulos, recomendando-se enfatizar os aspectos conceituais desta teoria em cursos introdutórios.

Complementando o trabalho de Ostermann e Moreira, Pereira e Ostermann [4] revisam mais de cem artigos sobre o ensino de FMC publicados nas revistas mais importantes de Ensino de Ciências do país e do exterior, segundo o Qualis da CAPES, no período de 2001 a 2006. Os autores classificam os artigos em quatro grupos: propostas testadas em sala de aula que apresentam resultados de aprendizagem; levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC; bibliografia de consulta para professores; análises de publicações relacionadas ao ensino de FMC. Mais da metade dos artigos analisados pelos autores está inserida no último grupo. Apesar do aumento, em comparação ao trabalho de Ostermann e Moreira, na quantidade de publicações nesta área, os autores salientam que a maioria dos artigos ainda se refere a bibliografias de consulta para professores. Apontam, também, para a escassez de estudos relativos à formação inicial e continuada de professores dado que, de todos os trabalhos analisados, somente quatro são concernentes a este tema. A sugestão final é de que é necessário investigar os processos conduzidos em sala de aula que estruturam e condicionam a aprendizagem, mesmo sabendo da importância no rigor e na ênfase que deve ser dada aos conceitos-chave.

Pantoja *et al.* [5] apresentam uma revisão sobre trabalhos de pesquisa em ensino de MQ no período de 1999 a 2009 publicados em revistas de Ensino de Física/Ciências, cujas classificações segundo o Qualis da CAPES, no ano de 2009, possuíam índices A1, A2, B1 e B2. Cinco grupos foram utilizados em sua classificação: propostas didáticas; implementação de propostas didáticas; estudos de concepções; análise curricular e críticas aos cursos introdutórios; análise teórica/epistemológica. Ao final desta revisão é apresentada uma análise da quantidade de publicações na área. O crescimento da pesquisa neste caso é nítido, principalmente ao se considerar que, dos 60 artigos encontrados, 27 foram publicados nos dois últimos anos da revisão. O destaque final fica para o aumento da quantidade de artigos publicados na categoria de implementação de propostas didáticas (cinco e oito trabalhos, respectivamente, nos dois últimos anos da revisão).

Silva e Almeida [6] publicam uma revisão da literatura sobre ensino de tópicos de MQ especificamente para o EM,

entre os anos de 1997 e 2010. Foram selecionados artigos de periódicos com acesso livre a partir da rede de computadores de uma das universidades públicas estaduais de São Paulo. Os trabalhos encontrados foram separados em cinco categorias: revisão da literatura sobre o ensino de MQ/FMC; análise curricular; análise dos conteúdos em livros que abordam MQ/FMC; elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino; concepções de professores sobre o ensino de MQ/FMC no EM. Os autores, ao final, apontam que a pertinência de se ensinar MQ no EM é cada vez mais consensual entre os pesquisadores da área. Especificamente, o consenso é maior na posição de que só faz sentido ensinar MQ no EM se for privilegiado o caráter qualitativo, conceitual, filosófico, cultural, em detrimento de um enfoque matemático. A constatação de inúmeras sugestões de formas de abordagem da MQ evidencia que não existe definição no que tange aos conteúdos a serem ministrados no EM. Há trabalhos que incluem o Princípio de Incerteza de Heisenberg, a interpretação probabilística da MQ, o conceito de spin e a dualidade onda-partícula, não se limitando ao efeito fotoelétrico, ao raio-X ou à quantização da energia. É ressaltada no trabalho, também, a necessidade de realização de mais pesquisas sobre o ensino de MQ no EM, para ampliar o conhecimento sobre o assunto e possibilitar que professores trabalhem tais tópicos em sala de aula.

Os artigos analisados nas resenhas acima se encontram referidos nas bibliografias respectivas.

III. UMA NOVA REVISÃO

As revisões da literatura mencionadas na seção acima contemplam trabalhos publicados até a década passada, conduzindo à conveniência de apresentação de uma nova resenha, com artigos publicados de 2010 até 2016. Um artigo de 2009, não contemplado pelas revisões anteriores, também foi considerado.

Na presente resenha introduz-se uma categorização dos trabalhos que conduz a uma dada classificação. Saliente-se que esta não é a única classificação possível e que muitos dos artigos encontrados podem se enquadrar em mais de uma categoria.

Foram arrolados artigos relacionados com o ensino de MQ e publicados em periódicos avaliados com conceitos A1, A2, B1 e B2, segundo o Qualis da CAPES. Ao todo foram examinadas oito revistas nacionais (Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência & Educação, Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências, Experiências em Ensino de Ciências, Investigações em Ensino de Ciências, Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia, Revista Brasileira de Ensino de Física, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências) e onze estrangeiras (American Journal of Physics, Enseñanza de las Ciencias, International Journal of Science Education, Journal of Research on Science Teaching, Latin American Journal of Physics Education, Physical Review Special Topics – Physics Education Research, Physics Education, Revista

Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, Science Education, Science & Education e The Physics Teacher).

Foram selecionados oitenta trabalhos, agrupados em cinco categorias: propostas pedagógicas; propostas didáticas implementadas; estudos sobre concepções de estudantes ou professores acerca de tópicos fundamentais de MQ; análise de material didático; estudos sobre formação continuada.

O primeiro conjunto inclui propostas pedagógicas apresentadas como material de consulta direcionado a professores de Física, em nível médio ou superior. A segunda categoria inclui propostas pedagógicas testadas em sala de aula ou em fase de implementação. O terceiro grupo abarca trabalhos em que foram averiguadas concepções, atitudes e ideias prévias de alunos e professores sobre tópicos de MQ. A quarta categoria se refere à análise de materiais didáticos para o ensino de FMC no EM e a quinta apresenta estudos sobre a formação continuada de docentes para análise e promoção da atualização curricular no EM.

Alguns dos trabalhos encontrados se enquadram em mais de uma categoria; optou-se, então, por situá-los naquela considerada mais próxima de seu propósito, lembrando que a classificação ora utilizada é apenas uma de muitas possíveis. Para a busca dos artigos, procurou-se encontrar palavras ligadas a FMC e MQ nos títulos e resumos, os textos completos propiciando detalhar a análise do material.

A. Propostas pedagógicas

São incluídos nesta categorização quinze artigos.

Em dois trabalhos diferentes, Gordon e Gordon [7, 8] apresentam dois jogos, baseados nos clássicos “campo minado” (minesweeper) e “raposa e cães de caça” (fox and hounds), como recursos para o ensino de conceitos de MQ de maneira divertida. O primeiro jogo introduz o “campo minado quântico”, que trabalha com os conceitos de superposição de estados, emaranhamento e não-localidade, e o segundo apresenta o “gato de Schrödinger e matilha”, que pode ser utilizado para abordar conceitos como os de superposição de estados, interferência construtiva e destrutiva, medições e emaranhamento. Neste último, é possível também tratar os conceitos de dualidade onda-partícula e descoerência, utilizando-o como um modelo. Este segundo jogo foi proposto, de modo preliminar, para 95 estudantes de ensino secundário em aula de uma hora e meia e acompanhado de um questionário de múltipla escolha, aplicado antes e depois da instrução, abordando superposição de estados, interferência, medição e emaranhamento. A compreensão dos estudantes acerca dos conceitos é apresentada em gráficos que indicam que a maior parte dos alunos respondeu o pós-questionário de modo correto. Além disto, muitos estudantes consideraram a atividade interessante e não muito longa e se mostraram interessados em outros materiais de aprendizagem envolvendo jogos, além de julgarem que este recurso auxiliou na compreensão de conceitos de MQ. Tais jogos, assim como outros dos mesmos autores, são considerados bons auxiliares para a compreensão do significado da superposição de estados e do emaranhamento.

Kuttner e Rosenblum [9] apresentam quatro variações de um experimento mental (gedankenexperiment), com foco no teorema de Bell e no emaranhamento, experimento este que pode ser trabalhado em cursos de física em qualquer nível de ensino. Como o fenômeno do emaranhamento quântico é usado atualmente em alguns processos industriais e discutido correntemente na literatura popular, faz-se necessário abordá-lo em sala de aula, inclusive porque divulgações pseudocientíficas apresentam este conceito de forma equivocada. Os autores consideram, ademais, que o contato com uma área tão próxima da fronteira da Física pode estimular o aluno para o aprendizado.

Preocupado com o insucesso de diversas tentativas de modernização dos cursos de Física nos últimos sessenta anos, Curtis [10] apresenta um curso qualitativo aberto projetado para desenvolver uma perspectiva do século XXI que pode ser incorporada ao início de uma sequência tradicional de física introdutória. Esta introdução deve ser realizada em duas a três semanas, em cursos que tipicamente possuem dois encontros semanais somando quatro horas. Um conjunto de áreas é proposto para fazer esta introdução: trajetória versus tempo de permanência; princípio de mínima ação e leis de conservação; estatística quântica; interações eletromagnéticas; relatividade e campo magnético; interações entre átomos neutros. Estas áreas foram escolhidas porque contêm conceitos que devem ser revisitados no modelo de ensino tradicional que se segue nos cursos. O artigo apresenta ainda breves descrições que ilustram cada uma dessas áreas, embora se considere que haja inúmeras formas de elas serem abordadas.

Dada a dificuldade experimental em realizar trabalhos com a câmara de bolhas, Gagnon [11] apresenta software computacional livre capaz de realizar a simulação do experimento em um nível muito próximo do real. Dados preliminares apontam para um sucesso na utilização desta simulação em aulas de mecânica, eletromagnetismo e física moderna. Nas aulas de mecânica o software foi usado para ilustrar e discutir conservação de energia e de momento em colisões. Em atividades de eletromagnetismo, a simulação foi útil para ilustrar o efeito de um campo magnético em partículas eletricamente carregadas e, em física moderna, professores e alunos consideraram importante seu uso para exemplificar um detector de partículas, introduzir mecânica relativística e discutir conservação de números quânticos.

Hobson [12, 13] apresenta duas abordagens diferentes para introduzir a MQ. No primeiro trabalho, o foco é o ensino do conceito de Incerteza. O autor utiliza pacotes de onda para explicar os resultados do experimento de dupla fenda e mostra também que, apesar da aleatoriedade existente nos eventos quânticos individuais, a estatística para grandes números destes eventos é previsível, indicando que uma visão meramente probabilística da MQ é incorreta.

O autor também argumenta que tal incerteza pode ser desprezível no mundo macroscópico, fazendo recair assim na Mecânica Clássica (MC). No segundo trabalho, o experimento de Rarity-Tapster-Mandel [14] é utilizado como ilustração e para auxiliar na compreensão do conceito de não-localidade e da desigualdade de Bell.

Considerando a linguagem como fundamental para a compreensão da Ciência e a construção de conceitos científicos, Paulo e Moreira [15] discutem a relevância da linguagem e da captação de significados da MQ para a inserção de seus conceitos fundamentais no EM. O problema da relação entre as linguagens clássica e quântica é levantado e os autores apresentam a opção da utilização da linguagem clássica para tratar os fenômenos quânticos, desde que a lógica seja modificada e torne-se condizente com a MQ. Assim, de acordo com os autores, a lógica científica subjacente à Física Clássica deve ser abandonada. A modificação na lógica presume a distinção entre diversos níveis de linguagem, em que o primeiro se refere a objetos (átomos, elétrons, etc.), o segundo, a enunciados sobre objetos, o terceiro, a enunciados acerca dos enunciados sobre objetos e assim sucessivamente.

Uma seleção de mais de quarenta animações interativas e visualizações gratuitas a serem utilizadas em diversos níveis de cursos de graduação para o ensino de MQ se encontra em Kohnle *et al.* [16]. As animações abordam diversos tópicos, a saber, o modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio, a análise probabilística de sistemas clássicos, pacotes de ondas, efeito fotoelétrico, Princípio de Incerteza de Heisenberg, poço finito, expansão em autoestados, medida e colapso da função de onda e informação quântica. Cada animação inclui um roteiro passo-a-passo salientando os pontos-chave. Em um diagnóstico realizado com estudantes que utilizaram individualmente as animações, os autores relatam a ocorrência de ganhos substanciais na aprendizagem daqueles que trabalharam com as animações.

Recorrendo a uma abordagem fenomenológica e conceitual, Pereira *et al.* [17] apresentam e discutem os postulados da MQ com auxílio de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. O conceito de estado do sistema é considerado como central na MQ por expressar um conjunto de informações sobre o sistema físico. Os autores então delineiam uma abordagem operacional para o ensino de MQ, com a intenção de contornar as dificuldades decorrentes do formalismo matemático que surgem no ensino desta teoria. Tal transposição didática pode contribuir para o primeiro contato de alunos de EM com a MQ e fazer com que conceitos como os de estado, autoestados, observáveis, superposição de estados, projeção e probabilidade façam mais sentido do que uma abordagem tradicional acerca do efeito fotoelétrico, radiação de corpo negro ou modelos atômicos semiclássicos.

Rau [18] apresenta dois exemplos de tópicos de MQ com origem na Astronomia, visando alunos de cursos de graduação: átomos sob a ação de fortes campos magnéticos; íon negativo do hidrogênio. Tais exemplos são considerados pelo autor como problemas fundamentais da MQ por tratarem de princípios e técnicas básicos, apresentar interesse prático e possuir importância histórica. O autor não informa se tais tópicos foram trabalhados em sala de aula.

Um conjunto de exemplos históricos e fenomenológicos, constituindo uma contribuição didática para a divulgação e compreensão da dualidade onda-partícula em um curso introdutório de MQ, é apresentado por Segura *et al.* [19].

Como recurso para cursos introdutórios de MQ, os autores sugerem a utilização do aporte histórico, desde as primeiras discussões sobre a natureza da luz no século XVII, o experimento de dupla fenda, as confirmações dos experimentos de Fresnel e Maxwell acerca da natureza ondulatória da luz e as ondas de matéria de De Broglie. Com esta apresentação, pretendem os autores introduzir quatro noções cruciais para a compreensão da MQ e que estruturam o fenômeno da dualidade onda-partícula: fusão, unificação, compatibilidade e percepção como um todo. Estas noções são consideradas fundamentais por propiciarem que problemas como o da superposição de estados e o da medição sejam abordados e tornem o mundo quântico mais compreensível.

Castrillón *et al.* [20] apresentam o formalismo da MQ para sistemas de dois níveis usando o princípio de superposição de estados e o emaranhamento quântico como conceitos básicos. São expostas também ideias sobre probabilidade, evolução e medição para embasar o problema da medição. A construção teórica é contextualizada com os experimentos de dupla fenda e de Stern-Gerlach e o interferômetro de Mach-Zehnder, além de implicações tecnológicas como a teleportação e a criptografia quântica. Ao final são apresentadas duas propostas didáticas, cada uma norteada por um dos conceitos básicos apresentados e que pode ser destinada tanto para professores em formação como para alunos de EM.

Fanaro *et al.* [21] apresentam uma sequência didática para alunos do último ano da escola secundária contendo um conjunto de situações destinadas a ensinar conceitos relativos à luz, enfatizando seu aspecto quântico. A descrição e a análise didática das situações seguem a teoria dos campos conceituais de Vergnaud, visando a antecipação dos possíveis invariantes operatórios que os estudantes devem utilizar para lidar com as situações. Por sua vez, as situações são apresentadas com base no enfoque dos caminhos múltiplos de Feynman, partindo de um conjunto de experiências relativas à luz que podem ser feitas em sala de aula, buscando-se, então, explicá-las segundo a visão da teoria quântica. As autoras apontam que a abordagem utilizada oferece uma via possível para que os estudantes construam os seguintes conceitos da MQ: caminhos alternativos, caminho de tempo mínimo e distribuição de probabilidade no experimento de dupla fenda. Além disso, considerações didáticas são feitas com base na teoria dos campos conceituais.

Para introduzir o princípio de exclusão de Pauli em um curso básico sobre a teoria quântica, Malgieri *et al.* [22] usam uma linha de raciocínio baseada na abordagem da soma de caminhos. O argumento, inicialmente proposto por Feynman, é trabalhado com uma discussão do experimento de Hong-Ou-Mandel com os alunos acerca da indistinguibilidade dos fótons e sua generalização usando elétrons. O experimento pode ser analisado usando o método de Feynman da ‘multiplicação de flechas’ para o tratamento de processos envolvendo mais de um objeto quântico. A abordagem descrita é considerada relevante, especialmente para a formação de professores de Ensino Médio para trabalhar a física moderna em um nível básico.

B. Propostas didáticas implementadas

São consideradas nesta classificação trinta publicações.

Baily e Finkelstein [23] relatam variações nas estratégias de ensino adotadas por professores a respeito da interpretação da MQ em dois cursos similares de Física Moderna da Universidade de Colorado e associam os impactos ocorridos nas perspectivas dos estudantes de física e de engenharia acerca da MQ. Três perspectivas são listadas para interpretação dos conteúdos abordados: agnóstica, quântica e realista. Questões sobre os tipos de práticas de instrução que podem estar associadas a variações nas perspectivas dos alunos foram analisadas, além de verificar se as perspectivas apresentadas pelos alunos em um contexto são aplicadas consistentemente em outro contexto em que o foco na interpretação seja menos explícito. Os autores observaram, também, variações contextuais nas crenças dos alunos sobre os sistemas quânticos, indicando que os instrutores que escolhem abordar questões de ontologia na mecânica quântica devem fazê-lo, de forma explícita, utilizando uma variedade de tópicos. Com isso, foram encontrados estudantes com tendência a adotar uma visão realista (ou seja, determinista e local) quando o professor abordava as ontologias dos alunos de forma branda.

Galvez [24] apresenta um formalismo matricial para explicar experimentos com fótons correlacionados em cursos de MQ na graduação, com inúmeras variações de alguns experimentos. Uma atividade opcional de laboratório foi desenvolvida em um curso de graduação e os resultados indicaram melhora na compreensão de tópicos abordados na disciplina regular de MQ pelos estudantes que realizaram a atividade. Relatórios dos experimentos e questionários ao final do curso também ajudaram a constatar a boa compreensão de tais tópicos. O autor acredita que o formalismo matricial auxiliou na explicação dos experimentos com fótons correlacionados e serviu também para introduzir alguns aspectos do emergente campo da informação quântica.

Kiouranis *et al.* [25] apresentam a análise da implementação de uma sequência didática sobre o comportamento de partículas e ondas no experimento de dupla fenda dirigida a estudantes de química quântica de um curso de Bacharelado em Química. A análise é fundamentada na teoria da transposição didática de Yves Chevallard, que possibilita a reflexão sobre o saber científico reelaborado para ser utilizado em situações de ensino, preocupando-se assim em tornar os conceitos mais compreensíveis para os alunos. Durante a verificação do saber ensinado, os autores comentam que os alunos expressaram suas ideias com interrupções, lacunas e linguagens coloquiais, influenciadas por diversos fatores, como o livro didático, a fala do professor e materiais de divulgação científica. Necessidades e possibilidades de aprendizagem foram identificadas, promovendo-se uma reorientação da prática do professor da disciplina através de um processo dinâmico de ação e reflexão.

Em um curso de nível secundário, Moreno e Guarín [26] apresentam sua experiência com o ensino de noções básicas

de MQ, a saber: uma ideia de tamanho, dualidade da matéria e o princípio de superposição de estados. O curso foi apresentado a quinze estudantes e teve o objetivo de aproximar as concepções espontâneas dos estudantes dos conceitos cientificamente aceitos, considerando as dificuldades que surgem quando se tenta abordar este conteúdo em tal nível de ensino, dado o grau de abstração e de formalismo matemático necessário. Para isso, a abordagem utilizada recorreu a analogias, discussões e desenho de aparatos experimentais e linguagem visual. Os estudantes foram avaliados através de pré-testes, pós-testes, montagens dos aparatos experimentais e entrevistas. Ao final, os autores apontam que acreditam que os estudantes de EM têm capacidade suficiente para aprender conteúdos de MQ.

Pearson e Jackson [27] descrevem uma série de experimentos com fótons individuais planejados como atividades práticas para o uso ao longo do segundo ano de um curso introdutório universitário de MQ. Inicialmente, demonstra-se que a fonte de luz derivada de um processo de conversão paramétrica espontânea produz resultados que só podem ser descritos segundo uma teoria quântica e que, portanto, podem ser aproximados para o regime de fótons individuais. Tais fótons foram submetidos a um interferômetro de Mach-Zehnder e as franjas de interferência foram observadas sempre que o caminho dos fótons não podia ser determinado. Todos os cálculos necessários para comprovar os resultados experimentais são apresentados pelos autores. Os experimentos foram apresentados, de forma preliminar, a estudantes de graduação e questionários de atitudes indicam que houve grande entusiasmo ao serem trabalhados em sala de aula, o que parece motivar os alunos a compreender a teoria por trás dos experimentos. Não são apresentados resultados sobre a real compreensão dos estudantes sobre os conceitos, princípios e fenômenos envolvidos nos experimentos.

A viabilidade de uma proposta pedagógica de curta duração para o ensino de MQ a alunos de graduação é analisada por Rocha *et al.* [28]. Um minicurso com seis horas visando estabelecer situações propícias para o ensino de conceitos de MQ foi elaborado e aplicado em três ocasiões para professores em formação ou em exercício. A receptividade dos tópicos abordados (experimento de dupla fenda, superposição de ondas e de vetores do plano, estados de sistemas quânticos, superposição de estados, evolução de sistemas quânticos, emaranhamento quântico e criptografia quântica) e comentários decorrentes, sugere que a ausência de discussões relativas aos conceitos fundamentais da MQ em cursos de graduação é muito sentida pelos alunos. Os conceitos de estado e de superposição linear de estados não foram considerados de difícil compreensão pelos participantes, face às situações apresentadas. Os autores sugerem que o ensino introdutório de MQ seja feito evitando o uso de conceitos da MC e com auxílio de inúmeras situações-problema nas quais os conceitos fundamentais da MQ são utilizados.

Deslauriers e Wieman [29] mediram a aprendizagem e a retenção de conceitos da MQ por estudantes de engenharia da Universidade de British Columbia. Dois grupos, um com

57 e outro com 63 estudantes, tiveram abordagens diferentes de ensino e um questionário previamente validado foi utilizado em ambos. Para o primeiro grupo foi oferecida uma abordagem tradicional de ensino, enquanto o segundo recebeu um curso diferenciado com leituras pré-classe, aulas interativas, questões rápidas para discussão entre os alunos e simulações computacionais, além de artigos sobre como pessoas aprendem e retêm o conhecimento. O primeiro grupo teve um desempenho 19% menor do que o segundo; a retenção de conceitos nos dois grupos, contudo, foi alta, como mostraram testes aplicados seis e dezoito meses após o término do curso. A alta retenção verificada contrasta com a aprendizagem obtida em cursos usuais de graduação e sinaliza para a importância de uma aprendizagem conceitual de MQ.

Kapon *et al.* [30] descrevem uma proposta didática delineada para examinar a aprendizagem de 14 estudantes que concluíram a escola secundária e que foram apresentados a palestras online proferidas por cientistas, sobre ideias avançadas de FMC (por exemplo, o efeito Aharonov-Bohm). Os alunos foram divididos em dois grupos, cada um recebendo instruções sobre MQ e Astrofísica de forma alternada. Uma atividade em grupo foi realizada logo após as palestras para que se pudesse categorizar a aprendizagem dos estudantes. Mesmo que as palestras fossem muito além de sua capacidade de compreensão, a análise das discussões indicou que os estudantes conseguiam inferir e progredir no domínio dos conceitos abordados nas palestras. Os grupos também foram submetidos a cinco testes (antes da primeira palestra, após a primeira palestra, após a atividade em grupo, após a segunda palestra e um teste de retenção um ano após as palestras). Os resultados indicam que a apresentação de tópicos de FMC deste modo, somada à instrução formal, pode auxiliar na incorporação desta área ao currículo e introduzir a Física de uma maneira mais relevante e útil para os alunos.

No decorrer de aulas sobre processos de transferência de calor para quinze alunos da segunda série de uma escola particular de EM, Lino e Fusinato [31] abordaram o problema da radiação de corpo negro, inserindo conceitos de MQ, como o da quantização da energia. O curso teve a duração de oito horas-aula e mapas conceituais foram utilizados como instrumentos de avaliação. Além disto, os alunos responderam um questionário com quatro questões, cujo objetivo era verificar as noções reveladas acerca da constituição da energia radiante de corpos aquecidos. As respostas foram separadas em duas categorias: respostas que apresentam bases conceituais apenas com conceitos clássicos; respostas que apresentam bases conceituais quânticas. A análise dos questionários indicou que ocorreu alteração no conceito subsunçor de energia, havendo incorporação da ideia de quantização nele, o que pode ser considerado como um primeiro indício de ocorrência de aprendizagem significativa. De acordo com os autores, a estrutura hierárquica de conceitos e as conexões presentes nos mapas conceituais também fornecem indício de ocorrência desta aprendizagem.

Pereira *et al.* [32] apresentam um estudo acerca da fala privada em uma atividade realizada por um grupo de alunos

de curso de Licenciatura em Física, recorrendo a um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. O objetivo era verificar a ocorrência de fala privada em adultos e analisar como este processo de mediação é utilizado em uma situação de resolução de problemas envolvendo conceitos de MQ. Foi constatada a ocorrência de fala privada, atribuindo-se isto às duas ferramentas fornecidas pelo cenário sociocultural: roteiro e software. Os resultados encontrados destacam a importância das atividades colaborativas no âmbito da pesquisa em Educação em Ciências.

Um relato de experiência acerca da difusão de conteúdo de FMC para professores e alunos de escolas públicas de EM é apresentado por Vicentini *et al.* [33]. O projeto foi desenvolvido em uma disciplina de curso de Licenciatura em Física e, com apoio de políticas universitárias e governamentais, os alunos fizeram apresentações em oito colégios, atingindo 850 alunos de EM, além de em cursos para professores da rede pública de uma cidade paranaense. Os temas abordados foram: Corpo Negro, Efeito Fotoelétrico, Constante de Planck, Dualidade Onda-Partícula, Origem do Universo, Evidências do Big Bang, Átomo de Bohr, Polaroides e Cristais Líquidos, Fissão e Fusão Nuclear, Física das Radiações, Laser, Raios X, Relatividade, Condutores e Isolantes, Semicondutores, Fibras Ópticas, Computação Quântica e Câmaras de Ionização. Para cada tema, uma série de recursos didáticos foi elaborada: seminários de trinta minutos, oficina para professores e alunos de EM, experimentos de baixo custo e pôster ilustrativo. Os resultados satisfatórios mostraram que o projeto contribuiu na complementação da formação escolar, na divulgação científica e no despertar do interesse dos estudantes pela área de exatas e tecnologia. Quanto aos professores, especificamente, o projeto foi bastante profícuo, em boa parte porque muitos dos que lecionavam Física no EM eram formados em Matemática e tinham dificuldades em trabalhar tópicos de FMC.

Em um estudo com 121 alunos de escola secundária da Nigéria, Adegoke [34] examina em que grau uma abordagem de engajamento interativo (evitando a competição em sala de aula e encorajando a discussão e cooperação) pode reduzir o hiato de gênero nos resultados de aprendizagem em Física Quântica. Dois grupos foram analisados: um deles recebeu uma abordagem tradicional de ensino enquanto o outro recebeu a abordagem com engajamento interativo. Foi preparado um guia instrucional para cada grupo, e aplicado um teste escrito de desempenho ao final da instrução. Os resultados encontrados permitiram ao autor considerar que o engajamento interativo efetivamente reduziu as diferenças de aprendizagem entre os estudantes.

Através da aplicação de uma proposta didática de doze horas-aula, Pantoja *et al.* [35] analisam a aquisição de conceitos como o de sistema físico, variáveis dinâmicas, estado de um sistema físico e evolução temporal por seis estudantes de um curso de mestrado profissional. A proposta foi embasada nas teorias de aprendizagem de Ausubel e de Vergnaud e três situações-problema foram utilizadas: experimento de Stern-Gerlach, átomo de hidrogênio e molécula de amônia. Problemas de lápis e papel, mapas

conceituais, entrevistas semiestruturadas e anotações de campo fizeram parte dos dados coletados. Considerou-se que foram obtidas evidências de aprendizagem significativa, tanto na forma predicativa como na operativa, porém algumas limitações na assimilação dos conceitos são mencionadas pelos autores. Dificuldades na compreensão dos conceitos de sistema físico, variáveis dinâmicas e, principalmente, de estado de um sistema físico são relatadas e para tais conceitos foram reafirmados seus significados em diversas oportunidades. Mesmo assim, foi considerado ter ocorrido aprendizagem significativa em quatro dos seis estudantes que participaram da instrução.

Com a análise de uma atividade didática centrada no interferômetro virtual de Mach-Zehnder, Pereira e Ostermann [36] apresentam dois exemplos de um estudo em que alunos de graduação em Física utilizam o discurso para promover a apropriação de um conceito. Na atividade, a construção de significados surge por meio de um processo de interanimação de vozes, ou seja, diversas vozes se colocam em contato em um mesmo enunciado, em que não é assinalado individualmente quem resolveu o problema. Isto indica que foi o grupo, enquanto “sistema”, que desempenhou tal função no plano intermental e não apenas uma pessoa. A importância das atividades em grupo desenvolvidas em aulas de Ciências fica assim destacada, sobretudo porque em muitas ocasiões se esperaria que nem mesmo o mais capaz dos membros do grupo conseguisse resolver o problema isoladamente.

A. F. G. Silva *et al.* [37] analisam o aprendizado de alunos de terceira série do EM de escolas públicas e privadas em uma cidade cearense. Um curso de Física Moderna de quarenta horas-aula foi ministrado para duas turmas de trinta alunos voluntários cada (uma com alunos de escola pública e uma com alunos de escola privada). O conteúdo abordado no curso compreendia: o átomo e o quantum; o núcleo atômico e a radioatividade; fissão e fusão nucleares; teoria especial da relatividade; teoria geral da relatividade. Foram utilizados experimentos, vídeos e simulações computacionais ao longo do curso. Na comparação entre as duas turmas, através de um pré e um pós-teste, constatou-se que o desempenho ao final do curso foi muito semelhante, mesmo com os alunos da escola privada apresentando uma base conceitual melhor no pré-teste. Os autores indicam, também, que o conteúdo de FMC pode ser abordado tanto em escolas públicas como privadas, principalmente se utilizados experimentos, vídeos e simulações, pois nas duas escolas os alunos conseguiram acompanhar o conteúdo apresentado e entender a parte conceitual, inclusive com referências ao cotidiano.

Preocupadas com algumas formas de simplificação usadas para apresentação de teorias físicas, visando tornar a física mais fácil, mas com risco de distorção do conteúdo e de prejudicar a aprendizagem, Levriani e Fantini [38] apresentam algumas perigosas simplificações para o ensino de MQ e discutem alguns exemplos de formas produtivas de complexidade que podem ser usados para delinear propostas de ensino e para se perceber ambientes apropriados de aprendizagem. Resultados empíricos envolvendo alunos italianos que estão no final do ensino secundário mostram

exemplos de reações dos estudantes ao adentrar a um mundo complexo e permite argumentar que a dificuldade natural em aprender conceitos de MQ pode ser transformada em desafios culturais que estão ao alcance dos alunos deste nível de ensino.

As dificuldades que estudantes de graduação, em fim de curso, e de pós-graduação possuem com relação a conceitos envolvendo soma de momento angular na MQ são descritas por Zhu e Singh [39]. Os estudantes analisados eram oriundos, em sua maioria, da Universidade de Pittsburgh, mas os autores apontam a existência de alunos de outras universidades, sem mencioná-las. As dificuldades apresentadas pelos estudantes são: dificuldades com a dimensão do espaço de Hilbert, dificuldades em identificar diferentes bases vetoriais para um produto entre espaços, dificuldade na construção de um operador matriz no produto entre espaços e perceber que a matriz correspondente a um operador pode ser muito diferente em outra base, dificuldades em encontrar as probabilidades de medida para um observável em um espaço produto e dificuldade em lidar com produto entre espaços correspondente à adição de momento angular orbital e momento angular intrínseco (spin) de uma partícula. Para reduzir estas dificuldades conceituais, um tutorial interativo foi desenvolvido e implementado e resultados preliminares mostram que a compreensão dos alunos acerca dos conceitos envolvidos melhorou, indicando assim o sucesso do tutorial.

Henriksen *et al.* [40] apresentam o projeto ReleQuant, no qual visam discutir como a física quântica e a relatividade restrita podem ser abordadas nos últimos anos da escola secundária, de forma a promover uma compreensão conceitual e reflexões filosóficas. Este projeto é baseado em módulos de ensino via web que contemplam competências indicadas no currículo nacional de física da Noruega, incluindo temas como relatividade geral, fótons emaranhados e consequências epistemológicas da física moderna. Segundo os autores, estes tópicos são considerados desafiadores tanto para o ensino como para a aprendizagem, devido a serem seus princípios e conceitos, abstratos e contraintuitivos. Três módulos foram testados em três turmas e os autores não se propõem a fazer uma análise profunda dos dados coletados, mas sim apresentar exemplos de resultados preliminares envolvendo o gato de Schrödinger e o uso da linguagem na aprendizagem. As entrevistas realizadas mostraram que os estudantes valorizam a oportunidade de conversar e discutir o conteúdo, com a finalidade de compreender conceitos tidos como difíceis.

Pantoja *et al.* [41] estudam a aquisição e retenção do conhecimento explícito e as operações de pensamento implícitas na MQ, de cinco estudantes de graduação em Física, matriculados pela primeira vez em uma disciplina de MQ. Uma proposta didática de doze horas de duração, baseada nas teorias da aprendizagem de Ausubel e de Vergnaud, foi implementada visando a abordagem dos conceitos de sistema físico, variáveis dinâmicas, estado de um sistema físico e evolução temporal. Os autores consideram que foram encontradas evidências de: mudança considerável de variáveis da estrutura cognitiva;

semelhanças (para os conceitos de sistema físico e de variáveis dinâmicas) e diferenças (para os conceitos de estado e de evolução temporal) na aquisição dos conceitos pelos estudantes; que quatro dos cinco estudantes adotaram processos mais próximos do polo significativo do que do polo mecânico da aprendizagem; inadequação do significado atribuído pelos estudantes ao conceito de probabilidade, antes, durante e depois da instrução, o que mostra uma tendência a ser, tal conceito, um obstáculo epistemológico natural que deve ser abordado com a apresentação de situações-problema associadas à MQ; que o conhecimento prévio, se levado em conta, tem um papel crucial na aquisição, na retenção e na resolução de problemas.

Rocha *et al.* [42] analisam as respostas de estudantes de EM a perguntas sobre o experimento de Stern-Gerlach, apresentadas em duas edições de um curso sobre os princípios da MQ que visou introduzir os conceitos de estado de um sistema físico e de superposição linear de estados, dentre outros. A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e a dos campos conceituais de Vergnaud serviram de referencial teórico para o projeto e o desenvolvimento do curso e para a análise das respostas dos alunos. Um total de 147 estudantes respondeu a um teste rápido, apresentado em uma das aulas do curso e 226 estudantes realizaram uma avaliação escrita ao final de uma das unidades. A análise do desempenho foi feita com uma interpretação quantitativa (teste t de Student e coeficiente de variação) e outra qualitativa (buscando indícios de aprendizagem nas respostas fornecidas). Os resultados mostram indícios de domínio inicial do campo conceitual da MQ pelos alunos, através da compreensão do experimento de Stern-Gerlach que, aliás, se apresentou como de fácil assimilação pelos estudantes e, segundo os autores, é recomendado para iniciar a abordagem de conceitos quânticos no EM, mesmo na primeira série.

Kohnle *et al.* [43] apresentam um estudo com a utilização de dezessete simulações computacionais a dezenove estudantes de graduação de uma universidade britânica em um nível introdutório de conhecimentos de MQ, totalizando 42 horas de sessão de observação. Os estudantes participaram do estudo de forma voluntária e, nas sessões de observação, interagiram livremente com as simulações, pensando em voz alta e apontando o que fazia sentido para eles e o que consideravam confuso. Após cada simulação os alunos trabalhavam em uma atividade associada, com questionários sobre a interação com a simulação e apresentando sugestões de melhorias. Cada sessão durou duas horas e os alunos utilizavam duas ou três simulações por sessão, com dois a quatro estudantes trabalhando em cada simulação ao mesmo tempo. O estudo também foi conduzido em disciplina do currículo da graduação da universidade; cinco simulações foram usadas com alunos que estavam no primeiro ou no segundo ano de graduação, enquanto quatro foram utilizadas com alunos em cursos avançados de MQ, seja com atividades em sala de aula ou atividades extraclasse. Em todos os níveis, os estudantes apontaram que as simulações beneficiaram o processo de aprendizagem dos conceitos envolvidos, como

os de emaranhamento e de variáveis ocultas. Os autores indicam que mais estudos são necessários para garantir que as simulações realmente sejam úteis para os estudantes.

Netto *et al.* [44] apresentam os resultados parciais de uma pesquisa de doutorado com investigação de estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão de alguns conceitos fundamentais de Física Quântica. Atividades didáticas mediadas por um interferômetro virtual de Mach-Zehnder trataram a complementaridade onda-partícula, tese importante da Interpretação de Copenhagen, visando abordar os fenômenos intermediários de interferência quântica. Fundamentando-se na teoria da mediação de Vygotsky e na filosofia translinguística de Bakhtin, os enunciados de uma dupla de estudantes foram analisados durante as atividades de simulação computacional, mediadas pelo uso de roteiros exploratórios concebidos para este fim. A pesquisa envolveu uma intervenção didática de onze horas-aula em uma disciplina do sexto semestre de curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, sendo este o primeiro contato formal dos estudantes com a Física do Século XX. A disciplina prioriza aspectos da Velha MQ, além de apresentar em seus conteúdos apenas a interpretação de Schrödinger dos fenômenos quânticos. Os resultados indicam que a compreensão evidenciada em determinadas passagens ao longo dos extratos discursivos provavelmente deu suporte aos estudantes para demonstrarem mudanças discursivas importantes no processo de compreensão dos conceitos abordados nas atividades didáticas.

Partindo da perspectiva sócio-interativa de Vygotsky, Soares *et al.* [45] analisam a utilização do computador e de simulações interativas para abordar espectroscopia, radioatividade e física nuclear junto a duas turmas de terceira série de EM. As simulações utilizadas estão disponíveis no site do Physics Educational Technology (PhET). Cada tópico foi trabalhado em aulas de cem minutos. O uso de simuladores interativos se mostrou como elemento facilitador da atividade docente, na perspectiva da teoria de Vygotsky, por permitir uma postura mais ativa (e efetiva) do professor no processo de mediação. Os autores indicam que o uso de tais simuladores auxilia no processo de ensino dos tópicos trabalhados, ajudando em sua compreensão e, também, despertando o interesse dos estudantes para o tema.

Biazus e Rosa [46] recorreram à teoria sociointeracionista de Vygotsky para estruturar uma sequência didática para a abordagem de tópicos de Física Moderna e Contemporânea e nortear sua implementação em sala de aula. A sequência foi estruturada em vinte encontros sendo utilizados vídeos, documentários, simuladores e atividades experimentais, entre outras ferramentas didáticas. Os dados foram coletados mediante o uso do diário de bordo e a discussão dos resultados foi baseada na análise das interações aluno-professor, aluno-aluno e aluno-material. Mesmo com alguma resistência inicial, os alunos se adaptaram à proposta e assumiram uma nova postura, não se criando um obstáculo para a aprendizagem. Ainda assim, as autoras apontam para a necessidade do desenvolvimento da

avaliação da proposta sob a perspectiva de professores que atuam no EM.

Brown *et al.* [47] descrevem um estudo realizado durante quatro anos em que estudantes de nível avançado resolveram quatro problemas em uma disciplina de física quântica de um curso de graduação. Os problemas foram apresentados em uma avaliação no meio e uma ao final do curso e aproximadamente metade dos alunos recebeu incentivos para corrigir seus erros na avaliação do meio do curso, a saber: os alunos poderiam receber de volta até metade dos pontos perdidos em cada problema resolvido incorretamente na avaliação. As soluções para os problemas foram fornecidas a todos os alunos, sendo o gabarito liberado aos que corrigiram os erros apenas após terem submetido suas correções ao instrutor. O desempenho dos alunos nos mesmos problemas ao final do curso sugere que os alunos que receberam incentivos para corrigir seus erros superaram significativamente os que não receberam. O incentivo teve maior impacto no resultado do exame final dos alunos que não tiveram bom desempenho na avaliação de médio prazo, indicando, segundo os autores, que um incentivo explícito para corrigir os erros pode ser uma ferramenta efetiva de avaliação formativa.

Ao longo de um semestre acadêmico, Körhasan *et al.* [48] investigaram como interações instrucionais afetaram os modelos mentais dos estudantes a respeito da quantização de observáveis físicos. Os modelos mentais foram analisados a partir de entrevistas e de observações feitas em sala de aula durante um curso de física moderna. A pesquisa mostrou que os modelos mentais são influenciados, principalmente, por três fatores: o modo de ensinar (que inclui metodologias de instrução e técnicas específicas de conteúdo) usado pelo instrutor, ordem dos tópicos e familiaridade com os conceitos e a relação com os pares.

Marshman e Singh [49] desenvolvem e avaliam um tutorial interativo de aprendizagem sobre o interferômetro de Mach-Zehnder com fótons individuais. Este tutorial foi utilizado com mais de oitenta estudantes de graduação e de doutorado em cursos de MQ para aplicações contemporâneas da ótica quântica. O tutorial ajudou os alunos a desenvolver a habilidade de aplicar conceitos fundamentais da MQ em situações físicas da ótica quântica e a explorar diferenças entre ideias clássicas e quânticas. Um arranjo para o experimento conhecido como borracha quântica é também proposto no tutorial, tendo auxiliado na criação de uma intuição para os fenômenos quânticos tidos inicialmente como contraintuitivos, além de promover uma integração entre a compreensão qualitativa e a quantitativa do experimento.

Um curso de extensão ministrado por professores universitários, estudantes de pós-graduação e de licenciatura a alunos de EM da cidade de Campinas, SP, é objeto de artigo de Pagliarini e Almeida [50], que analisam as respostas dos alunos a um questionário com o fito de verificar como os alunos compreendem textos de divulgação científica escritos por cientistas sobre o início da MQ. Dois textos foram apresentados aos alunos, um deles escrito por Max Planck, e a análise foi norteadada pela Análise de Discurso, segundo a vertente de Michel Pêcheux. As aulas

foram realizadas em espaços diversificados como laboratórios, museu de ciências e demais espaços educativos, ocorrendo também a aplicação de atividades pautadas em pesquisas em desenvolvimento. Os autores apontam que, apesar de a leitura de textos de divulgação científica e de originais de cientistas não ser uma atividade corriqueira nas atividades escolares, a diversidade de sentidos atribuídos pelos estudantes ao novo assunto abre possibilidades para uma maior interação do professor e atenta para a necessidade de sua mediação quanto a dúvidas e equívocos.

Pedersen *et al.* [51] acreditam que um ambiente virtual de aprendizagem pode envolver os estudantes universitários no processo de aprendizagem de uma forma que as aulas tradicionais (lectures) e os formatos de laboratório não conseguem. Apresentam, assim, um ambiente de aprendizagem virtual chamado StudentResearcher, que incorpora simulações, questionários de múltipla escolha, palestras em vídeo e gamificação, visando um caminho de aprendizagem para MQ no nível universitário avançado. StudentResearcher foi construído com base nas experiências acumuladas em oficinas com o jogo Quantum Moves nos níveis secundário e universitário, em que os jogos foram usados para ilustrar conceitos básicos de MQ. O primeiro teste deste novo ambiente de aprendizagem virtual ocorreu em um curso de 2014 em Mecânica Quântica Avançada na Universidade de Aarhus com 47 alunos matriculados. O programa foi bem recebido pelos alunos e suas notas melhoraram tão logo o programa foi introduzido, sendo possível encontrar uma correlação entre o uso do programa e as notas. Os autores sugerem estudos futuros acerca da aprendizagem individual dos alunos e que esta poderia estar ligada a diferentes motivações em relação à atividade e aos seus resultados.

Sayer *et al.* [52] investigam a eficácia de uma abordagem Just-in-Time Teaching, que incluiu testes de conceitos em classe usando perguntas do tipo “clickers”, em um curso de mecânica quântica para alunos de graduação de nível júnior e sênior. Foi analisado o desempenho de vinte alunos em testes de leitura nas atividades antes das aulas, clickers em sala de aula respondidos individualmente e clickers respondidos após a discussão em grupo. O desempenho nestas atividades foi comparado com testes abertos de retenção aplicados após todas as atividades de instrução sobre os mesmos conceitos, a saber: átomo de hidrogênio, partículas idênticas, estatística quântica, teoria de perturbação dependente e independente do tempo e outros métodos de aproximação para resolução da equação de Schrödinger independente do tempo. Em comparação com os questionários de leitura, o desempenho dos alunos melhorou quando perguntas individuais foram feitas após as aulas que focavam nas dificuldades dos alunos encontradas através do feedback eletrônico. O desempenho nos clickers posteriores à discussão de grupo e após as respostas individuais ao primeiro clicker também mostrou melhora. Algumas razões possíveis para a melhora no desempenho são discutidas em vários estágios como, por exemplo, de testes de leitura antes da aula a clickers após a aula e de aplicações individuais de clickers a aplicação em grupos.

C. Estudos sobre concepções

São arroladas 25 publicações nesta categoria.

Hilger *et al.* [53] apresentam resultados preliminares de uma investigação com o objetivo de identificar e caracterizar possíveis representações sociais compartilhadas por um grupo de estudantes, a partir de dados obtidos com o uso de testes de associação escrita e numérica de conceitos.

Os testes foram aplicados a 236 estudantes de EM de todas as séries, na região de Porto Alegre, Brasil. Os resultados sugerem que conceitos de MQ são apresentados aos alunos principalmente através da mídia, e este não sendo um assunto abordado tradicionalmente em salas de aula. Entrando em contato com tal conteúdo alternativo, os estudantes constroem ou começam a construir representações sociais da MQ. Os autores consideram que compreender as representações sociais pode auxiliar na aprendizagem significativa da MQ, bem como avaliar a influência dos meios de divulgação sobre as ideias dos indivíduos a respeito do tema.

Akarsu [54] apresenta um estudo com a intenção de esclarecer alguns dos problemas mais comuns no ensino de tópicos de MQ, a saber: dificuldades de aprendizado, estratégias de ensino insuficientes, problemas conceituais e de instrução. O estudo foi realizado em cinco universidades dos Estados Unidos e o autor utilizou um questionário com 29 questões que foi respondido por 86 estudantes de cursos de Ciência e de Engenharia, entre 19 e 21 anos, que participavam de cursos de MQ. Cinco professores de MQ dos departamentos de Física também foram entrevistados. Além de questionários e entrevistas, outras fontes de dados são citadas, por exemplo, tarefas de casa, provas finais, livros-texto e atividades de laboratório. Nas entrevistas, os professores revelaram que os estudantes em geral se esforçam para compreender a base abstrata, a formulação matemática e os diversos níveis de instrução. Os questionários apontaram que 69% dos estudantes adquiriram um nível adequado de compreensão da MQ, fração considerada baixa pelo autor. Uma das sugestões feitas é a de não apresentar o modelo atômico de Bohr para evitar que os estudantes criem uma noção incorreta acerca das órbitas de elétrons. Com o amparo das ‘Guidelines for College Physics Program’, o autor sugere diferentes abordagens, como a utilização de laboratório aberto e troca de instrutores no decorrer do curso, para possibilitar uma melhor compreensão de conceitos da MQ. A oferta de cursos extracurriculares de física-matemática antes dos cursos de MQ também é apontada como algo a ser considerado.

O resultado de entrevistas com dezenove alunos da Universidade de Colorado sobre um curso de física moderna introdutória é discutido por Baily e Finkelstein [55]. Quando perguntados sobre sua interpretação preferida para a MQ, os estudantes tendem a adotar o posicionamento de especialistas da física, o que permitiu a categorização em três temas interpretativos: variáveis ocultas, ondas de informação ou de matéria e colapso da função de onda. Uma estrutura para caracterizar as interpretações dos estudantes sobre MQ é apresentada, além de se demonstrar sua utilidade na interpretação de respostas contraditórias que os

estudantes forneceram a levantamentos anteriores. As respostas indicam, também, que os estudantes geralmente ficam reticentes em suas respostas quando o que se considera intuitivo não lhes parece a resposta correta, ressaltando a necessidade de distinguir claramente as perspectivas pessoais e públicas para estudantes de física moderna em nível introdutório.

Acreditando que as dificuldades na compreensão de conceitos de MQ ao longo de muitos anos se devem à influência de conceitos básicos de MC, Ladj *et al.* [56] apresentam um questionário a estudantes de terceiro ano de universidades argelinas antes e depois de estudar a MQ. Os conceitos com dificuldade de compreensão são a função de onda, o princípio de incerteza, o princípio de superposição de estados e o princípio de complementaridade. A abordagem didática incluiu, de forma introdutória, uma discussão sobre o significado dos conceitos da MQ, por uma hora e meia por semana ao longo de um mês. O resultado foi comparado com alunos do quinto ano, que não tiveram a mesma abordagem instrucional, visando mostrar a importância dos aspectos educacionais e epistemológicos. Segundo os autores, os resultados indicam que é importante ter uma compreensão conceitual das ideias abstratas expressas na representação matemática usada pela MQ e que, quando há essa compreensão, é mais fácil utilizar as ferramentas matemáticas inerentes à teoria.

McKagan *et al.* [57] desenvolvem e validam um questionário com doze questões para analisar a compreensão de aspectos conceituais da MQ, utilizado para avaliar a eficácia de diferentes métodos de ensino desta teoria. Os conteúdos abordados no questionário são, dualidade onda-partícula, equação de Schrödinger, medição, operadores e observáveis, princípio de incerteza, quantização de estados, densidade de probabilidade e função de onda, superposição e tunelamento. As questões foram redigidas baseadas em entrevistas com especialistas sobre os conceitos mais importantes de MQ, na análise do resumo de livros-texto de FMC e de MQ e observação de aulas e de sessões informais de estudos de uma disciplina de FMC introdutória para alunos de engenharia. A validação foi realizada através de entrevistas com 49 estudantes de diversos cursos de graduação (física e engenharias), revisão de especialistas e análise estatística. Para a análise estatística, o questionário foi aplicado a diversos estudantes dos mesmos cursos de graduação das entrevistas realizadas.

Com a finalidade de analisar dificuldades conceituais e matemáticas de quinze estudantes de graduação em Física na Turquia, Özcan [58] aplica um questionário com duas questões abertas, envolvendo propriedades básicas de MC e MQ. Os estudantes, com idades entre 21 e 23 anos, já haviam realizado um curso de MQ e tardaram cerca de vinte minutos para responder o questionário. Foi possível categorizar as respostas dos alunos em três grupos para a MC (a MC apresenta um ponto de vista holístico; as predições da MC são deterministas; a estrutura matemática da MC é diferente da utilizada na MQ) e quatro para a MQ (sistemas subatômicos são descritos pela MQ; o movimento do sistema é descrito pela equação de Schrödinger; as previsões da MQ são baseadas em probabilidades; a

estrutura matemática da MQ é diferente daquela da MC). Nove subgrupos de análise são apresentados para a MC e outros nove para a MQ. O estudo indica que os estudantes possuem dificuldades para identificar diferenças entre MC e MQ e que as descrições apresentadas para os prováveis caminhos de aprendizagem devem servir para melhorar o currículo e desenvolver novas estratégias de ensino.

Destacando o Princípio de Incerteza e a Dualidade Onda-Partícula como fundamentais para a compreensão da MQ, Ayene *et al.* [59] apresentam um trabalho que enfatiza as descrições de estudantes sobre estes conceitos. Um estudo fenomenográfico, com uma entrevista semiestruturada, foi realizado com 25 estudantes de curso de graduação em física de uma universidade etíope. A descrição dos estudantes sobre dualidade onda-partícula foi mapeada em três categorias: clássica, mista e semiquântica. A descrição do conceito de incerteza foi separada em quatro grupos: incerteza como propriedade extrínseca do processo de medição, princípio de incerteza como erro ou incerteza de medição, incerteza como distúrbio da medição e incerteza como o princípio de incerteza da MQ. De modo geral, os estudantes tiveram a tendência de mostrar uma visão mais clássica na interpretação da MQ; uns poucos estudantes, entretanto, utilizaram fenômenos tipicamente ondulatórios como interferência e difração em sua descrição das propriedades ondulatórias de entidades quânticas. Este resultado é extremamente consistente com o que havia sido encontrado em estudos anteriores pelos autores.

Considerado como elemento importante no ensino do formalismo da MQ, o experimento de Stern-Gerlach é utilizado por Zhu e Singh [60] para a compreensão de alguns conceitos como o da preparação de um específico estado quântico a partir de um estado arbitrário, a evolução temporal da função de onda e a medição em MQ. A análise foi realizada através de entrevistas individuais com mais de duzentos estudantes de Física de várias universidades dos Estados Unidos em cursos de pós-graduação e de graduação e que cursavam disciplinas de MQ. Os estudantes apresentaram dificuldades na distinção entre o espaço físico (em que o experimento é realizado) e o espaço de Hilbert (em que se situa o estado do sistema) e na preparação de um estado quântico específico em um espaço de Hilbert bidimensional. As dificuldades encontradas serviram como guia para a elaboração de um tutorial visando auxiliar os estudantes no aprendizado de princípios fundamentais da MQ com o uso do experimento de Stern-Gerlach. Em análises preliminares, o tutorial pareceu realmente melhorar a compreensão de conceitos da MQ no contexto deste experimento.

Pereira e Ostermann [61] analisam o modo como recursos textuais disponíveis moldam as explicações de futuros professores de Física sobre MQ. O estudo foi desenvolvido em uma disciplina introdutória de MQ de um curso de licenciatura, sendo este o primeiro contato formal dos estudantes com esta matéria. Os estudantes foram submetidos a um teste do tipo lápis e papel com uma questão conceitual sobre o formalismo da MQ e uma aplicação da equação de Schrödinger independente do tempo para um elétron preso em um potencial quadrado

infinito. O teste foi aplicado a pequenos grupos (dois ou três alunos) e constituiu uma das avaliações do curso, sendo permitido consultar o material de apoio da disciplina e acessar a internet. Microfones e gravadores de som foram instalados para registro do áudio das conversas dos alunos. A análise dos discursos mostrou que as primeiras explicações dos alunos se basearam na dicotomia “determinismo-probabilismo”, ora em combinação com a explicação geral do Princípio de Incerteza, ora com o postulado de Born, que afirma que o quadrado do módulo da função de onda representa a densidade de probabilidade de se encontrar o objeto quântico em uma determinada região do espaço. A introdução de textos explicativos na resolução da questão permitiu que os estudantes subvertessem suas respostas, inserindo novos conceitos, e que ficassem mais próximos de uma explicação completa e adequada ao problema proposto.

Para investigar as dificuldades que os estudantes possuem a respeito da MQ não-relativística de uma partícula em uma dimensão espacial, Zhu e Singh [62] desenvolvem e aplicam um questionário a mais de duzentos estudantes de graduação e pós-graduação de dez universidades. O questionário apresenta perguntas relacionadas a possíveis funções de onda, estados ligados e de espalhamento, processos de medição, valores esperados, papel do Hamiltoniano e dependência temporal da função de onda e de seus valores esperados. Os resultados apontam grande dificuldade dos estudantes na compreensão destes conceitos e sugerem que tutoriais e métodos de ‘peer-instruction’ podem ajudar a reduzir significativamente tais dificuldades. Os autores também observam que cursos de graduação de MQ não têm sido efetivos em auxiliar na compreensão destes tópicos, principalmente porque, em geral, o foco é mantido em avaliações quantitativas.

Hilger e Moreira [63] apresentam resultados preliminares de uma investigação sobre eventuais representações sociais da teoria quântica, possivelmente compartilhadas entre 238 estudantes do EM, todos da mesma cidade. O objetivo do trabalho era o de identificar e caracterizar possíveis representações sociais utilizando testes de associação numérica e escrita de conceitos, além de técnicas de análise multidimensional para o estudo dos dados obtidos. Segundo os autores, a compreensão dessas representações pode fornecer indícios acerca da influência dos meios de divulgação sobre as ideias dos indivíduos a respeito de conceitos científicos. Tais representações integram o conhecimento prévio do aluno e terão papel fundamental para a ocorrência de aprendizagem significativa da Física Quântica, caso possam ser caracterizadas como subsunçores. Os resultados apontam que as representações sociais dos conceitos quânticos são desenvolvidas de forma a que podem se tornar grandes obstáculos epistemológicos para a compreensão dos conceitos cientificamente aceitos.

Sinarcas e Solbes [64] analisam o processo de ensino-aprendizagem em estudantes de segunda série do EM da Espanha e mostram as principais dificuldades enfrentadas por eles, principalmente as de cunho ontológico e epistemológico. Após a aplicação de um questionário a 78

estudantes e a análise de 10 livros didáticos, os autores consideram que os alunos possuem grandes dificuldades de compreensão da MQ, especialmente sobre o espectro descontínuo do átomo de Bohr, a diferença entre estado clássico e estado quântico de um sistema, a implicação tecnológica da MQ, e que os livros não conduzem à aprendizagem significativa dos conteúdos abordados, pois não introduzem os conceitos de forma crítica. O trabalho apresenta uma crítica razoável à prática tradicional para o ensino de MQ, posto que os estudantes não compreendem efetivamente o papel da teoria quântica, e aponta uma nova abordagem para seu ensino. Os pesquisadores defendem que o ensino de MQ deve ser desenvolvido considerando o currículo oficial, os resultados da pesquisa educacional e o desenvolvimento histórico da MQ, incluindo conceitos e conteúdos procedimentais e tópicos da Natureza da Ciência e das relações Ciência-Tecnologia-Sociedade. Uma unidade de ensino obedecendo estes pontos foi desenvolvida e utilizada com alunos de EM para verificar se há superação das dificuldades e êxito nos objetivos propostos.

Usando um experimento mental para o experimento de dupla fenda como ferramenta de diagnóstico, Asikainen e Hirvonen [65] avaliam a compreensão de nove professores de física em formação inicial e dezoito professores de física em exercício com uma variedade de experiências sobre o ensino de física moderna no nível secundário. Um teste do tipo lápis e papel foi usado e três professores foram entrevistados. Os resultados apontam que faltam a muitos professores conceitos e princípios básicos da física e isso impediu o uso dos experimentos pensados, seja com partículas, luz ou elétrons. A compreensão da natureza ontológica de partículas clássicas, luz e elétrons parece ser essencial para um bom andamento das atividades com experimentos pensados. Os professores em exercício, ainda assim, pareceram estar mais preparados para utilizar experimentos pensados do que os em formação inicial. Sugere-se, então, que os experimentos pensados e, em particular, o experimento de dupla fenda, devam ter um peso maior na formação de professores, mesmo que a experiência no ensino de física moderna pareça ter papel preponderante no desenvolvimento das habilidades de professor.

Didiç *et al.* [66] apresentam a primeira parte de um estudo visando examinar os modelos mentais de 31 estudantes acerca da quantização de observáveis físicos, tais como luz, energia e momento angular, em um curso de Física Moderna. Os estudantes eram provenientes de curso de graduação em física ou em ensino de física. A análise qualitativa, segundo diversas entrevistas realizadas com os estudantes, revelou seis variações dos modelos mentais sobre a quantização dos observáveis físicos: modelo científico, modelo científico primitivo, modelo de retalhamento, modelo alternado, modelo integrado e modelo evolutivo. Os modelos apresentados pelos estudantes foram determinados conforme o contexto e, além disso, alguns alunos apresentavam um modelo misto, com a utilização de múltiplos modelos mentais, para explicar um fenômeno, usando-os de forma inconsistente.

Tratando do ensino das interpretações da MQ, Baily e Finkelstein [67] analisam a visão que professores têm acerca

do ensino de interpretações da MQ e mostram que a abordagem utilizada varia entre os professores, que as diferentes abordagens de instrução têm diferentes impactos no pensamento dos alunos e que, quando as interpretações dos alunos não são consideradas, estes usualmente desenvolvem visões próprias sobre a MQ que, em geral, não são as cientificamente desejadas. Os autores sugerem, então, a introdução de um novo currículo para o ensino de Física, que contempla as interpretações dos alunos e que fornece argumentos capazes de ajudar os estudantes a desenvolver interpretações mais consistentes de fenômenos quânticos, visões mais sofisticadas sobre a incerteza e mais interesse na MQ.

Emigh *et al.* [68] apresentam o resultado de um estudo sobre a compreensão de estudantes acerca da evolução temporal de estados quânticos. Com base nas respostas de alunos de graduação a quatro atividades de resolução de exercícios inter-relacionadas, as dificuldades foram categorizadas segundo os erros mais comuns apresentados. O grupo de alunos participantes da pesquisa incluiu desde os que estavam no começo do curso até outros que já o estavam terminando. As tarefas 1 e 2 foram ministradas a mais de 400 alunos, a tarefa 3 a mais de 250 alunos e a tarefa 4 a mais de 200 alunos. As dificuldades encontradas foram agrupadas nas seguintes grandes categorias: tendência a confundir a dependência temporal de diferentes quantidades, falha em atribuir a correta dependência temporal de fases da função de onda, tendência a interpretar incorretamente o formalismo matemático usado para a dependência temporal, tendência em aplicar ideias sobre evolução temporal que estão fora do modelo quântico. Os resultados encontrados ajudaram os pesquisadores a elaborar um programa de tutoriais sobre MQ e a desenvolver e testar estratégias instrucionais para ajudar os estudantes a aprofundar sua compreensão sobre a evolução temporal de estados quânticos. Alguns dos erros encontrados persistiram até o final do curso, indicando que as dificuldades conceituais estão profundamente arraigadas nos alunos; isto sugere mais pesquisas tanto para descrever tais problemas como para documentar quais estratégias instrucionais surtem mais efeito na aprendizagem dos conceitos envolvidos.

Gire e Price [69] identificam quatro características estruturais de três notações da MQ (Dirac, função de onda algébrica e matricial): individualização, grau de externalização, compactação e simbologia de suporte para regras computacionais. Os autores ilustram no trabalho como o raciocínio de oito estudantes de graduação interage com estas características estruturais em episódios de entrevistas sobre um estado de superposição de um sistema em um potencial quadrado infinito. Os estudantes envolvidos participavam de cursos avançados de MQ e a coleta de dados foi feita através de uma entrevista semiestruturada de trinta minutos em que foram estimulados a resolver exercícios. Foram encontradas evidências de que os alunos coordenam diferentes notações através do uso da notação de Dirac, usando-a para orientar seu trabalho em outra notação. Esses usos são adotados pelo alto grau de individualização, compacidade e simbologia de suporte para

regras computacionais e pelo grau moderado de externalização fornecido pela notação de Dirac.

Visando a criação de um instrumento de análise de trabalhos sobre as dificuldades de compreensão em MQ, Marshman e Singh [70] descrevem uma estrutura para entender o padrão das dificuldades de raciocínio de estudantes e como desenvolvem o domínio dos conteúdos de MQ. As autoras consideram que os desafios que muitos estudantes encontram ao estudar MQ são análogos aos enfrentados quando estudam MC e incorporam tanto os efeitos da diversidade dos estudantes em sua base teórica prévia, objetivos e motivação, como a mudança de paradigma da MC para a MQ. A estrutura se baseia em investigações empíricas que mostram que os padrões de raciocínio, resolução de problemas e dificuldades de automonitorização da MQ têm uma semelhança notável com aqueles encontrados em MC. Com esta estrutura e contemplando os paralelos entre as dificuldades nestes dois domínios de conhecimento, as pesquisadoras consideram que é possível, então, analisar a extensa literatura de pesquisa em Ensino de Física para orientar a concepção de ferramentas de ensino e aprendizagem que ajudem os estudantes a desenvolver competências em MQ.

Utilizando, em diversos níveis de ensino, um questionário com três questões sobre conceitos e fundamentos de MQ, Passante *et al.* [71] estudam a habilidade apresentadas por estudantes em determinar os possíveis níveis de energia associados a uma dada função de onda e um hamiltoniano, em determinar as probabilidades de obtenção de cada valor de energia em um processo de medição e como isso depende do tempo e em reconhecer como o processo de medição de energia afeta o estado do sistema. A análise mostra que as respostas dos alunos podem ser agrupadas em cinco conjuntos de dificuldades conceituais e de raciocínio: falha em compreender a relação entre a função de onda e os possíveis valores para a energia no processo de medição; tendência em associar a dependência temporal de medidas de energia com propriedades dos estados estacionários; dificuldades relacionadas ao conhecimento obtido fora de sala de aula; falha em reconhecer a dependência temporal de um sistema isolado determinada pela equação de Schrödinger; falha em reconhecer o papel do hamiltoniano na determinação dos possíveis valores de medida. Os autores indicam que um passo crítico na construção de um currículo eficaz para o ensino de MQ é o de identificar as ideias que fundamentam os erros que os estudantes cometem sobre um determinado tópico, especialmente alunos que estejam no Ensino Médio. Além disso, concluem que algumas das dificuldades mais comuns parecem ser persistentes e ressurgem nas perguntas que são feitas aos estudantes de maneiras diferentes ou em novos contextos.

Passante *et al.* [72] afirmam que, embora muitos alunos consigam usar com sucesso a ideia da superposição de estados para calcular as probabilidades de diferentes resultados de medição, muitas vezes são incapazes de identificar as implicações experimentais de um estado de superposição. Segundo os autores, os estudantes não conseguem reconhecer como um estado de superposição e

um estado misto podem produzir diferentes resultados experimentais. Os dados encontrados pelos pesquisadores sugerem que a superposição na MQ é um conceito difícil para os alunos de diversos níveis de ensino, desde o Ensino Médio até a pós-graduação. Uma palestra ministrada pelos autores melhorou a compreensão dos alunos sobre a superposição quântica e um estudo longitudinal indicou que o impacto persistiu após uma instrução adicional de MQ por três meses, que não tratou especificamente dos mesmos temas.

Como parte de uma pesquisa sobre a aprendizagem de estudantes do primeiro semestre de um curso de MQ em final de graduação, Sadaghiani e Pollock [73] apontam a necessidade de se desenvolver um instrumento de alta qualidade para a avaliação da aprendizagem de conceitos visando a comparação dos resultados de diferentes abordagens curriculares. A versão inicial do questionário foi composta de quatorze questões de múltipla escolha e, após refinamento e análise estatística, foi ampliada para 31 questões abordando tópicos sobre medidas em MQ, tais como: a equação de Schrödinger independente do tempo, funções de onda e condições de contorno, evolução temporal e densidade de probabilidade. O questionário foi respondido por mais de trezentos estudantes e o instrumento é apontado como um bom meio de verificação da eficiência de diferentes currículos e de estratégias de ensino sobre a compreensão conceitual de estudantes de MQ. O instrumento foi devidamente validado e considerado fidedigno, segundo a análise apresentada.

A. C. Silva *et al.* [74] apresentam um estudo dividido em duas partes. Inicialmente fazem uma síntese do paradoxo EPR e analisam suas possibilidades para o currículo de Física, não pretendendo abordar detalhadamente o assunto, mas apenas oferecer algumas noções sobre ele. Em uma segunda parte, os autores mostram os resultados de uma pesquisa exploratória realizada com cinquenta estudantes ingressantes em cursos superiores de Física e Matemática, considerados como recém-egressos da escola secundária. Pautados na Análise de Discurso de Michel Pêcheux, visam compreender como os alunos interpretam elementos do paradoxo EPR a partir da leitura de fragmentos de um texto de divulgação científica. Mesmo que a maioria dos participantes tenha relatado dificuldades na breve leitura realizada, algo até esperado por conta das condições de produção imediata e a provável novidade do tema, pareceu aos autores que o texto proporcionou pequenos incrementos/construções em suas histórias de leitura sobre o assunto e elencam diversos motivos para a inserção do paradoxo EPR no currículo de Física do EM, tais como possibilitar o contato com um tópico de Física Quântica, notar um aspecto da evolução histórica das ideias científicas, compreender que na Física são criados modelos que procuram explicar a natureza e notar que os modelos científicos são desenvolvidos a partir de pressupostos filosóficos nem sempre explícitos, entre outros.

Supondo que a MQ possui uma dificuldade natural devido ao seu trato matemático e que é algo desafiador por conta de suas grandes diferenças com o paradigma da Mecânica Clássica, Singh e Marshman [75] apresentam um

estudo sobre as dificuldades de raciocínio em aproximadamente duzentos estudantes de cursos avançados quanto à teoria quântica em diversas universidades e analisam os estudantes em atividades de resolução de problemas e as habilidades metacognitivas necessárias nestes cursos. Para coletar os dados, a pesquisa recorreu a testes escritos de resposta aberta ou de múltipla escolha sobre temas abordados nos cursos e entrevistas foram realizadas com um subconjunto de estudantes visando investigar as dificuldades conceituais e desvelar os mecanismos cognitivos. Os resultados das investigações realizadas sugerem que há grandes diversidades no desempenho dos estudantes nos cursos, que envolvem a universidade, o livro-texto ou o instrutor e que muitos estudantes não adquiriram uma compreensão funcional dos conceitos fundamentais. Além disto, as autoras arrolam mais de quarenta dificuldades de raciocínio apresentadas pelos estudantes, desde as mesmas encontradas em cursos de Física Básica até a generalização de termos da MC para a MQ que não são diretamente aplicáveis. Com isto, esperam que estas dificuldades norteiem o desenvolvimento de ferramentas e abordagens que melhorem a aprendizagem dos estudantes sobre a MQ.

Savall-Aleman *et al.* [76] apresentam um estudo visando identificar os problemas que estudantes do EM, professores e estudantes universitários encontram ao tentar explicar espectros atômicos. Para isso, os autores identificam conceitos-chave que qualquer modelo quântico para a emissão e absorção de radiação eletromagnética deve incluir para explicar os espectros de gases. Os conceitos-chave apresentados são muito próximos ao modelo de Bohr, mas não foi feita referência a algum modelo atômico em particular. Tais conceitos são: energia é quantizada nos átomos, energia é quantizada na radiação, toda transição é produzida pela interação entre um único fóton e um único elétron do átomo. Adicionalmente, dois questionários foram elaborados, sendo um para professores e outro para estudantes. Analisando as respostas, os pesquisadores concluem que: professores carecem de um modelo quântico para a emissão e absorção de radiação eletromagnética capaz de explicar os espectros; professores e alunos compartilham as mesmas dificuldades; as dificuldades dizem respeito ao modelo do átomo, ao modelo da radiação e ao modelo da interação entre eles. Ao final do trabalho, os autores indicam a construção de uma sequência didática para cursos fundamentais de física quântica visando a compreensão do modelo de Bohr e do modelo quântico de radiação baseados no conceito de fóton. Aplicações iniciais desta sequência indicam um impacto positivo na compreensão dos estudantes.

Escudero *et al.* [77] analisam os recursos empregados pelos alunos ao responder perguntas envolvendo conteúdo referente a fenômenos considerados intangíveis e ligado ao mundo em diferentes escalas, como é o caso da interação da radiação eletromagnética com a matéria. A pesquisa foi realizada em três situações-problema baseadas no efeito fotoelétrico tendo, a partir de sua análise, identificado cinco categorias nas respostas, levando à reflexão sobre a construção de um conceito essencial das ciências naturais,

tal como o de energia e sua relação com as ideias de interação entre radiação e matéria, dualidade onda-partícula e quantum, entre outros. Uma gama de conceitos de referência é apresentada com o intuito de ser um suporte à formação de conceitos, objetivo final do processo de aprendizagem.

D. Análise de material didático

Esta categoria abarca oito trabalhos.

Kohnle *et al.* [78] descrevem animações e visualizações animadas para ensinar MQ em nível introdutório e médio na Universidade de Saint Andrews, no Reino Unido. Tal material visa ajudar os estudantes a construir representações mentais dos conceitos de MQ e foca em conhecidas áreas de dificuldades e de ideias errôneas (por exemplo, densidade de probabilidade e poço finito) através da inclusão de animações e explicações, passo a passo, dos pontos centrais da teoria. Todo o conteúdo é disponibilizado gratuitamente e possui recursos adicionais disponíveis para os instrutores. Em uma investigação sobre a eficácia educacional do material, tanto quanto à atitude dos estudantes como a seu desempenho, 61 estudantes responderam a um questionário que revelou que consideraram positivo o uso das animações e que fizeram uso substancial delas. Além disso, um teste com doze questões mostrou que estudantes de dois níveis diferentes obtiveram ganhos de aprendizagem distintos nos tópicos analisados pelos autores, com os de nível introdutório obtendo um desempenho de 38% a 50% maior que os de nível intermediário.

Em uma análise da presença de tópicos de FMC em livros didáticos de EM disponibilizados pelo Programa Nacional do Livro Didático do Ensino Médio (PNLEM), Domingui [79] apresenta a opinião dos autores acerca da inserção destes temas no EM. Cinco livros foram analisados, todos contendo tópicos de FMC, seja em forma de capítulo, unidade ou em textos dispersos ao longo da obra. Os autores de dois livros consideram que a FMC não é conteúdo específico de EM e deve ficar como um suplemento informativo dentro de outros capítulos, e ministrado somente se houver tempo e disponibilidade no currículo; os outros três autores defendem a inserção de FMC como essencial no EM, a ausência de tais temas sendo considerada absurda e insustentável.

Utilizando conceitos do método da “Soma de vários caminhos” formulado por Richard Feynman, Fanaro *et al.* [80] apresentam uma análise do experimento de dupla fenda com luz. São listados aspectos básicos da MQ que mostram as vantagens desta formulação para a abordagem no nível médio. Destaca-se, em especial, que esta formulação descreve fenômenos de interferência ignorando o eletromagnetismo clássico, que pode gerar uma conceitualização inadequada pelos estudantes e, além disso, permite a introdução de aspectos quânticos como a probabilidade de ocorrência de um evento e a natureza discreta da emissão e da detecção da luz. Desta forma, segundo os autores, a análise traz uma possível estratégia para ensinar conceitos de MQ a alunos de escola secundária.

Simon *et al.* [81] analisam um conjunto de livros de divulgação científica que abordam a MQ, visando sua utilização em cursos de nível superior. Dez livros foram selecionados segundo alguns critérios estabelecidos pelos autores: grau de adequação ao público-alvo, conceitos abordados, adoção de formulações matemáticas ou não e menção a experimentos ou não. Os autores consideram que os livros de divulgação científica, ao apresentar os conceitos de forma rigorosa, podem se tornar uma opção plausível para discussões em disciplinas de MQ no ensino superior, sendo que nove dos dez livros analisados se mostraram adequados para uso nas condições apresentadas. Salienta-se também que, apesar disso, a mera utilização dos livros analisados em sala de aula não fará com que o tema seja abordado de forma mais conceitual, mas pode ser um suporte para o professor. Ademais, é necessário que a didática do professor seja revista e que ele tenha um profundo conhecimento sobre o tema, para poder trabalhar os conceitos de forma clara e motivadora sem envolver cálculos matemáticos sofisticados.

Kohnle *et al.* [82] apresentam um panorama sobre um conjunto gratuito de materiais online para o ensino e a aprendizagem a serem usados em um primeiro curso de MQ em universidades, iniciando-se por sistemas de dois níveis. O texto principal contém oitenta artigos, organizados por áreas, com coautoria de renomados especialistas e que podem ser usados de forma a propiciar abordagens alternativas. Muitos dos materiais incluem simulações computacionais interativas com atividades e conjuntos de problemas que permitem ao estudante melhorar sua compreensão sobre a MQ. Tópicos de álgebra linear necessários para a devida compreensão do conteúdo também estão incluídos. As soluções das atividades estão disponíveis para os instrutores e os recursos apresentados podem ser usados de diversas formas, desde como um suplemento para cursos já existentes ou, mesmo, como um curso completo.

Visando encontrar posicionamentos epistemológicos, Lautesse *et al.* [83] analisam cinco livros didáticos franceses publicados em 2012, ano em que conteúdos de MQ voltaram ao currículo oficial em escolas secundárias francesas, após vinte anos de ausência. Na base da construção histórica da MQ, os autores apontam dois posicionamentos epistemológicos, sem indicar se um deles seria melhor que o outro. Uma das posturas é a conservadora, próxima à chamada escola de Copenhagen, e a outra é a inovadora, associada aos trabalhos de Bunge e de Lévy-Leblond. Acredita-se que a identificação destas escolhas epistemológicas por parte dos autores dos livros didáticos pode auxiliar os professores a refletir sobre as raízes históricas e epistemológicas da MQ, o que pode contribuir para o desenvolvimento e implementação de sequências didáticas. Ao final do trabalho, são discutidas também as aplicações dos dois posicionamentos epistemológicos na análise do experimento de dupla fenda de Young.

Pinheiro [84] apresenta uma sugestão de construção para a câmara de nuvens, discute os fenômenos envolvidos e seu princípio de funcionamento e propõe possíveis temas de discussão para a sala de aula de Física do EM, utilizando o aparato construído. O autor sugere que o equipamento pode

ser utilizado em qualquer dos três anos do Ensino Médio ou, até mesmo, nos anos finais do Ensino Fundamental, visando essencialmente um contato inicial dos alunos com o tema em questão. O aparato pode ensejar discussões sobre conceitos de Física Clássica (mudanças de estados físicos da matéria, relações entre variação de temperatura, energia, mudanças de fase e processos de transferência de calor) e de Física Moderna (radiações ionizantes, raios cósmicos, radiação natural, partículas elementares e métodos de detecção). Em uma aplicação, em 2009, com abordagem histórica crítica, embasada pela epistemologia de Bachelard, os alunos discutiram a evolução do conceito de átomo e a elaboração de modelos atômicos ao longo dos séculos. Estas discussões foram incorporadas ao conteúdo de Eletrostática e partilhadas com a disciplina de Química. Segundo o autor, com esta abordagem os alunos conseguiram compreender melhor os riscos usados pelos físicos para identificar as partículas elementares, algo observado nos mapas conceituais sobre a constituição da matéria confeccionados pelos alunos e nas perguntas e discussões que ocorreram em sala de aula.

O livro *Alice no País do Quantum* [85] é analisado por Souza e Neves [86], sob perspectivas fabular, científica e metafórica, com o intuito de fornecer subsídios para professores utilizarem este material de forma paradidática em aulas de física de Ensino Médio. Além de dar suporte ao livro didático, sugere-se que o livro paradidático seja utilizado no início da abordagem de tópicos de MQ e que funcione como um mediador para a aproximação aos conceitos científicos e como facilitador da aprendizagem.

E. Estudos de formação continuada

Incluem-se aqui apenas dois trabalhos publicados.

Considerando que a inserção de tópicos de FMC no EM é consensual entre pesquisadores na área de ensino de física, J. R. N. Silva *et al.* [87] elaboram um trabalho visando proporcionar a atualização das práticas de professores das redes de ensino público e privado em assuntos relacionados a conteúdos específicos de FMC. Um grupo de estudos/discussão foi formado e buscou-se investigar a presença de Necessidades Formativas para os professores de Ciências, concluindo que a participação em um grupo envolvendo tópicos de FMC pode suscitar nos participantes o desenvolvimento dessas características, principalmente no que se refere à possibilidade de explicarem fenômenos antes desconhecidos. As Necessidades Formativas são características consideradas necessárias para a formação de um bom professor e incluem: romper a visão simplista do ensino de ciências; conhecer a matéria a ser ensinada; questionar as ideias docentes do senso comum; adquirir conhecimentos teóricos sobre a aprendizagem das ciências; saber preparar atividades capazes de gerar uma aprendizagem efetiva; saber avaliar. Com base na análise individual dos professores do grupo, acreditam os autores que a metodologia de trabalho adotada pode servir como um modelo para grupos de formação continuada de professores de ciências.

Sabino e Pietrocola [88] apresentam um mapeamento de saberes docentes que devem ser desenvolvidos para que professores implementem sequências didáticas inovadoras no EM. A aplicação de uma sequência didática sobre dualidade onda-partícula para alunos de terceira série do EM foi feita por dois professores em escolas públicas da região metropolitana de São Paulo. As aulas foram gravadas com o programa Videograph e analisadas e o referencial teórico dos saberes docentes de Tardif foi utilizado para a criação de categorias de ação (expor, dialogar, orientar em geral, orientar individualmente, gerir a classe) que explicitam a prática didática ao longo do curso. A partir destas categorias, foi possível investigar episódios específicos, mostrando que é necessário desenvolver um saber curricular voltado às novas estratégias durante a formação inicial e, se possível, garantir que os docentes participem da elaboração de propostas inovadoras por meio de formação continuada, aumentando as crenças de autoeficácia, diminuindo os obstáculos e minimizando a formação docente ambiental, cruciais para a modificação da inércia escolar.

IV. CONSIDERAÇÕES ACERCA DA REVISÃO DA LITERATURA

Apresenta-se neste trabalho uma síntese de cinco artigos de revisão publicados em anos anteriores, além de uma nova resenha abarcando o período de 2010 a 2016, em que o foco são trabalhos relacionados ao ensino de conceitos fundamentais de MQ. O tema inclui, pela correlação, também alguns artigos sobre ensino de FMC.

Das cinco revisões anteriores mencionadas, três apresentam trabalhos compreendendo exclusivamente tópicos de MQ [3, 5, 6], enquanto as demais abordam trabalhos sobre tópicos de FMC. No primeiro dos trabalhos de revisão apresentados [2] considera-se que o pequeno número de artigos relacionados a estudos sobre concepções alternativas e a propostas testadas em sala de aula deve incentivar a pesquisa nessa área. No segundo artigo [3] observa-se que os trabalhos listados indicam que os estudantes não compreendem satisfatoriamente os conceitos da MQ, mesmo que muitas das pesquisas realizadas não sejam conclusivas a respeito. Além disto, os autores criticam as abordagens tradicionais da MQ e recomendam ênfase nos aspectos conceituais da teoria em cursos introdutórios. No terceiro trabalho [4], os autores comentam haver escassez de estudos relativos à formação inicial e continuada de professores e sugerem investigar os processos conduzidos em sala de aula que estruturam e condicionam a aprendizagem, mesmo sabendo da importância no rigor e na ênfase que devem ser dados aos conceitos-chave. No quarto trabalho [5] destaca-se o aumento da quantidade de artigos publicados na categoria de implementação de propostas didáticas (cinco e oito trabalhos, respectivamente, nos dois últimos anos da revisão) e que tais implementações ocorrem, em sua maioria, no Ensino Superior (21 dos 25 trabalhos encontrados). Para a aplicação destas propostas, os autores apontam que as metodologias mais utilizadas são a aula expositiva, a instrução via laboratórios virtuais ou uma

combinação destas duas. O quinto trabalho [6] é específico para artigos relacionados com o EM e os autores observam que a pertinência de se ensinar MQ no EM é cada vez mais consensual entre os pesquisadores da área, além de destacarem que a existência de inúmeras sugestões de formas de abordagem da MQ evidencia a falta de definição no que tange aos conteúdos a serem ministrados no EM. Os autores ressaltam, também, a necessidade de realização de mais pesquisas sobre o ensino de MQ no nível médio, visando ampliar o conhecimento sobre o assunto e possibilitar que professores trabalhem vários tópicos em sala de aula.

Não há indicação do número de trabalhos analisados nas revisões apresentadas em [2] e [3], mas se estima que sejam mais de 50 trabalhos na primeira revisão e mais de 40 na segunda. Pereira e Ostermann [4] apontam 102 artigos encontrados com sua temática de estudo, enquanto Pantoja *et al.* [5] enfocam 60 trabalhos e Silva e Almeida [6] relacionam 23 artigos. Isto indica que, desde a década de 1970 e até a de 2000, cerca de 270 artigos foram analisados nestas revisões. Este número pode ser um pouco menor, visto que alguns artigos aparecem em mais de uma resenha.

A atual revisão, relativa ao período de 2010 a 2016, destaca oitenta trabalhos relacionados ao tema de FMC, particularmente sobre tópicos de MQ. Foram encontrados 34 trabalhos relativos ao EM ou com implicações para ele (nove em propostas pedagógicas, onze em propostas didáticas implementadas, sete em estudos sobre concepções, cinco em estudos sobre material didático e dois em estudos de formação continuada). No período em análise, a revisão inclui o conteúdo e os temas mais atuais de MQ apresentados no Ensino de Física, segundo os periódicos analisados. As cinco revisões anteriores apontaram escassez ora na aplicação de propostas didáticas, ora nos estudos de levantamento de concepções, enquanto na presente revisão constata-se que os trabalhos estão bastante concentrados na segunda e terceira categorias com, respectivamente, 25 e 30 trabalhos encontrados, indicando que os estudos desta década sobre a inserção de tópicos de MQ visam especialmente a análise da compreensão conceitual da MQ e das concepções adotadas pelos estudantes. Alguns dos trabalhos encontrados neste levantamento mostram que várias destas abordagens compreendem o ensino de conceitos e princípios da MQ em níveis mais aprofundados, tais como em cursos de bacharelado ou de pós-graduação. Em contrapartida, foi possível constatar que existem poucos trabalhos, dentre os analisados, que visam a implementação de uma proposta didática com conceitos e princípios fundamentais da MQ para alunos de EM. Chama a atenção, também, o pequeno número de artigos relacionados à formação continuada de professores (do EM) nesta área, o que parece estar sugerindo a conveniência de ampliar a oferta de cursos e análises de resultados correspondentes a estes docentes.

O desafio inerente à pesquisa neste campo de conhecimento fica explícito em praticamente todos os trabalhos apresentados, seja os relativos ao EM, ao ensino superior ou na formação continuada de professores. Isto, no entanto, não deve oferecer obstáculos para o

desenvolvimento de tais pesquisas em Ensino de Física, mas sim promover uma busca por diferentes formas de apresentação da MQ, visando a atualização curricular e o interesse dos alunos nos conteúdos de Física e na carreira científica. Atente-se para o fato de a tecnologia atual estar em uma fase de ampla aplicação de consequências da MQ, destacando ainda mais a matéria para o ensino em diversas carreiras de nível médio e superior.

REFERÊNCIAS

- [1] Dicke, R. H. and Wittke, J. P., *Introduction to quantum mechanics*. (Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1973).
- [2] Ostermann, F. and Moreira, M. A., *Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”*, Investigações em Ensino de Ciências **5**, 23-48 (2000).
- [3] Greca, I. M. and Moreira, M. A., *Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória*, Investigações em Ensino de Ciências **6**, 29-56 (2001).
- [4] Pereira, A. P. and Ostermann, F., *Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente*, Investigações em Ensino de Ciências **14**, 393-420 (2009).
- [5] Pantoja, G. F., Moreira, M. A. and 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).
- [6] Silva, A. C. and Almeida, M. J. P. M., *Física quântica no ensino médio: o que dizem as pesquisas*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **28**, 624-652 (2011).
- [7] Gordon, M. and Gordon, G., *Quantum computer games: quantum minesweeper*, Phys. Educ. **45**, 372-377 (2010).
- [8] Gordon, M. and Gordon, G., *Quantum computer games: Schrödinger cat and hounds*, Phys. Educ. **47**, 346-354 (2012).
- [9] Kuttner, F. and Rosenblum, B., *Bell’s theorem and Einstein’s ‘spooky actions’ from a simple thought experiment*, Phys. Teach. **48**, 124-130 (2010).
- [10] Curtis, L. J., *A 21st century perspective as a primer to introductory physics*, Eur. J. Phys. **32**, 1259-1274 (2011).
- [11] Gagnon, M., *A bubble chamber simulator: a new tool for the physics classroom*, Phys. Educ. **46**, 443-450 (2011).
- [12] Hobson, A., *Teaching quantum uncertainty*, Phys. Teach. **49**, 434-437 (2011).
- [13] Hobson, A., *Teaching quantum nonlocality*, Phys. Teach. **50**, 270-273 (2012).
- [14] Rarity, J. G. and Tapster, P. R., *Experimental violation of Bell’s inequality based on phase and momentum*, Phys. Rev. Lett. **64**, 2495-2498 (1990).
- [15] Paulo, I. J. C. and Moreira, M. A., *O problema da linguagem e o ensino da mecânica quântica no nível médio*, Ciência & Educação **17**, 421-434 (2011).
- [16] Kohnle, A., Cassettari, D., Edwards, T. J., Ferguson, C., Gillies, A. D., Hooley, C. A., Korolkova, N., Llama, J. and Sinclair, B. D., *A new multimedia resource for teaching*

quantum mechanics concepts, *Am. J. Phys.* **80**, 148-153 (2012).

[17] Pereira, A. P., Ostermann, F. and Cavalcanti, C. J. H., *Um exemplo de “distribuição social da mente” em uma aula de física quântica*, *Ciência & Educação* **18**, 257-270 (2012).

[18] Rau, A. R. P., *Topics in quantum physics with origins in astronomy: two examples*, *Am. J. Phys.* **80**, 406-416 (2012).

[19] Segura, A., Nieto, V. and Segura, E., *Un análisis profundo del fenómeno dualidad onda partícula para la comprensión del mundo cuántico*, *Latin American Journal of Physics Education* **6**, 137-142 (2012).

[20] Castrillón, J., Freire Jr., O. and Rodríguez, B., *Mecânica quântica fundamental, una propuesta didáctica*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1505 (2014).

[21] Fanaro, M. L. A., Elgue, M. and Otero, M. R., *Secuencia para enseñar conceptos acerca de la luz desde el enfoque de Feynman para la mecánica cuántica en la escuela secundaria: un análisis basado en la teoría de los campos conceptuales*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **33**, 477-506 (2016).

[22] Malgieri, M., Tenni, A., Onorato, P. and Ambrosio, A., *What Feynman could not yet use: the generalised Hong–Ou–Mandel experiment to improve the QED explanation of the Pauli exclusion principle*, *Phys. Educ.* **51**, 055002 (2016).

[23] Baily, C. and Finkelstein, N. D., *Teaching and understanding of quantum interpretations in modern physics courses*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **6**, 010101 (2010).

[24] Galvez, E. J., *Qubit quantum mechanics with correlated-photon experiments*, *Am. J. Phys.* **78**, 510-519 (2010).

[25] Kiouranis, N. M. M., Sousa, A. R. and Santin Filho, O., *Alguns aspectos da transposição de uma sequência didática sobre o comportamento de partículas e ondas*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, **9**, 199-224 (2010).

[26] Moreno, H. and Guarín, E., *Nociones cuánticas en la escuela secundaria: Un estudio de caso*. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **4**, 669-676 (2010).

[27] Pearson, B. J. and Jackson, D. P., *A hands-on introduction to single photons and quantum mechanics for undergraduates*, *Am. J. Phys.* **78**, 471-484 (2010).

[28] Rocha, C. R., Herscovitz, V. E. and Moreira, M. A., *Introdução à mecânica quântica: uma proposta de minicurso para o ensino de conceitos e postulados fundamentais*, *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* **3**, 1-15 (2010).

[29] Deslauriers, L. and Wieman, C., *Learning and retention of quantum concepts with different teaching methods*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **7**, 010101 (2011).

[30] Kapon, S., Ganiel, U. and Eylon, B. S., *Utilizing public scientific web lectures to teach contemporary physics at the high school level: A case study of learning*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **7**, 020108 (2011).

[31] Lino, A. and Fusinato, P. A., *A influência do conhecimento prévio no ensino de física moderna e*

contemporânea: um relato de mudança conceitual como processo de aprendizagem significativa, *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* **4**, 73-100 (2011).

[32] Pereira, A. P., Ostermann, F. and Cavalcanti, C. J. H., *A ocorrência de ‘fala privada’ entre adultos: uma estratégia analítica para o estudo das funções intrapsicológicas no ensino de ciências*, *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências* **13**, 105-120 (2011).

[33] Vicentini, A., Melquiades, F. L., Miyahara, R. Y., Borrero, P. P. G., Vicentini, E., Bastos, R. O. and Santos, S. A., *Instrumentação para o ensino de física moderna e sua inserção em escolas de ensino médio - relato de experiência*, *Experiências em Ensino de Ciências* **6**, 38-44 (2011).

[34] Adegoke, B. A., *Impact of interactive engagement on reducing the gender gap in quantum physics learning outcomes among senior secondary school students*, *Phys. Educ.* **47**, 462-470 (2012).

[35] Pantoja, G. F., Moreira, M. A. and Herscovitz, V. E., *Implementation of a didactic proposal on fundamental concepts of quantum mechanics with students of a professional master’s degree in physics teaching*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **6**, 519-529 (2012).

[36] Pereira, A. P. and Ostermann, F., *Recursos e restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* **12**, 9-28 (2012).

[37] Silva, A. F. G., Andrade Jr., J. A. and Nobre, F. A. S., *Ensino de física moderna: um estudo de caso com ensino público e privado*, *Experiências em ensino de ciências* **7**, 1-10 (2012).

[38] Levrini, O. and Fantini, P., *Encountering productive forms of complexity in learning modern physics*, *Sci. Educ.-Netherlands* **22**, 1895–1910 (2013).

[39] Zhu, G. and Singh, C., *Improving student understanding of addition of angular momentum in quantum mechanics*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **9**, 010101 (2013).

[40] Henriksen, E. K., Bungum, B., Angell, C., Tellefsen, C. W., Frågåt, T. and Bøe, M. V., *Relativity, quantum physics and philosophy in the upper secondary curriculum: challenges, opportunities and proposed approaches*, *Phys. Educ.* **49**, 678-684 (2014).

[41] Pantoja, G. F., Moreira, M. A. and Herscovitz, V. E., *La enseñanza de conceptos fundamentales de Mecánica Cuántica a alumnos de graduación en Física*, *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias* **9**, 22-39 (2014).

[42] Rocha, C. R., Herscovitz, V. E. and Moreira, M. A., *The Stern-Gerlach experiment as a problem-situation to the learning of concepts and principles of quantum mechanics in secondary school*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **8**, 4401 (2014).

[43] Kohnle, A., Baily, C., Campbell, A., Korolkova, N. and Paetkau, M. J., *Enhancing student learning of two-level quantum systems with interactive simulations*, *Am. J. Phys.* **83**, 560-566 (2015).

[44] Netto, J. S., Cavalcanti, C. J. H. and Ostermann, F., *Estratégias discursivas adotadas por professores em formação na compreensão do fenômeno da*

- complementaridade em atividades didáticas mediadas pelo interferômetro virtual de Mach-Zehnder, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* **15**, 293-320 (2015).
- [45] Soares, A. A., Moraes, L. E. and Oliveira, F. G., *Ensino de matéria e radiação no ensino médio com o auxílio de simuladores interativos*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 915-933 (2015).
- [46] Biazus, M. O. and Rosa, C. T. W., *Abordagem de tópicos de mecânica quântica no ensino médio partindo da aproximação com o cotidiano*, *Experiências em Ensino de Ciências* **11**, 159-177 (2016).
- [47] Brown, B. R., Mason, A. and Singh, C., *Improving performance in quantum mechanics with explicit incentives to correct mistakes*, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **12**, 010121 (2016).
- [48] Körhasan, N. D., Eryılmaz, A. and Erkoç, Ş., *The influence of instructional interactions on students' mental models about the quantization of physical observables: a modern physics course case*, *Eur. J. Phys.* **37**, 015701 (2016).
- [49] Marshman, E. and Singh, C., *Interactive tutorial to improve student understanding of single photon experiments involving a Mach-Zehnder interferometer*, *Eur. J. Phys.* **37**, 024001 (2016).
- [50] Pagliarini, C. R. and Almeida, M. J. P. M., *Leituras por alunos do ensino médio de textos de cientistas sobre o início da física quântica*, *Ciência & Educação* **22**, 299-317 (2016).
- [51] Pedersen, M. K., Skyum, B., Heck, R., Müller, R., Bason, M., Lieberoth, A. and Sherson, J. F., *Virtual learning environment for interactive engagement with advanced quantum mechanics*, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **12**, 013102 (2016).
- [52] Sayer, R., Marshman, E. and Singh, C., *Case study evaluating just-in-time teaching and peer instruction using clickers in a quantum mechanics course*, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **12**, 020133 (2016).
- [53] Hilger, T. R., Moreira, M. A. and Silveira, F. L., *Estudo de representações sociais sobre Física Quântica*, *Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia* **2**, 1-16 (2009).
- [54] Akarsu, B., *Einstein's redundant triumph "quantum physics": an extensive study of teaching/learning quantum mechanics in college*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **4**, 273-285 (2010).
- [55] Baily, C. and Finkelstein, N. D., *Refined characterization of student perspectives on quantum physics*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **6**, 020113 (2010).
- [56] Ladj, R., Oldache, M., Khiari, C. E. and Belarbi, T., *On students' misunderstanding of the basic concepts of quantum mechanics: the case of Algerian Universities*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **4**, 286-293 (2010).
- [57] McKagan, S. B., Perkiş, K. K. and Wieman, C. E., *Design and validation of the quantum mechanics conceptual survey*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **6**, 020121 (2010).
- [58] Özcan, Ö., *How do the students describe the quantum mechanics and classical mechanics?*, *Lat. Am. J. Phys. Educ.* **4**, 22-26 (2010).
- [59] Ayene, M., Kriek, J. and Damtie, B., *Wave-particle duality and uncertainty principle: phenomenographic categories of description of tertiary physics students' depictions*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **7**, 020113 (2011).
- [60] Zhu, G. and Singh, C., *Improving students' understanding of quantum mechanics via the Stern-Gerlach experiment*, *Am. J. Phys.* **79**, 499-507 (2011).
- [61] Pereira, A. P. and Ostermann, F., *Recursos e restrições nas explicações de futuros professores de física sobre mecânica quântica*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* **12**, 9-28 (2012).
- [62] Zhu, G. and Singh, C., *Surveying students' understanding of quantum mechanics in one spatial dimension*, *Am. J. Phys.* **80**, 252-259 (2012).
- [63] Hilger, T. R. and Moreira, M. A., *A study of social representations of quantum physics held by high school students through numerical and written word association tests*, *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias* **8**, 52-61 (2013).
- [64] Sinarcas, V. and Solbes, S., *Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la física cuántica en el bachillerato*, *Enseñanza de las Ciencias* **31**, 9-25 (2013).
- [65] Asikainen M. A. and Hirvonen, P. E., *Probing pre- and in-service physicist teachers' knowledge using the double-slit thought experiment*, *Sci. Educ.-Netherlands* **23**, 1811-1833 (2014).
- [66] Didiş, N., Eryılmaz, A. and Erkoç, Ş., *Investigating students' mental models about the quantization of light, energy, and angular momentum*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **7**, 020128 (2014).
- [67] Baily, C. and Finkelstein, N. D., *Teaching quantum interpretations: revisiting the goals and practices of introductory quantum physics courses*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020124 (2015).
- [68] Emigh, P. J., Passante, G. and Shaffer, P. S., *Student understanding of time dependence in quantum mechanics*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020112 (2015).
- [69] Gire, E. and Price, E., *Structural features of algebraic quantum notations*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020109 (2015).
- [70] Marshman, E. and Singh, C., *Framework for understanding the patterns of student difficulties in quantum mechanics*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020119 (2015).
- [71] Passante, G., Emigh, P. J. and Shaffer, P. S., *Examining student ideas about energy measurements on quantum states across undergraduate and graduate levels*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020111 (2015).
- [72] Passante, G., Emigh, P. J. and Shaffer, P. S., *Student ability to distinguish between superposition states and mixed states in quantum mechanics*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 020135 (2015).
- [73] Sadaghiani, H. R. and Pollock, S. J., *Quantum mechanics concept assessment: development and validation study*, *Phys. Rev. Spec. Top.-PH* **11**, 010110 (2015).
- [74] Silva, A. C., Almeida, M. J. P. M. and 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* **32**, 53-75 (2015).

- [75] Singh, C. and Marshman, E., *Review of student difficulties in upper-level quantum mechanics*. Phys. Rev. Spec. Top.-PH **11**, 020117 (2015).
- [76] Savall-Aleman, F., Domènech-Blanco, J. L., Guisasola, J. and Martínez-Torregrosa, J., *Identifying student and teacher difficulties in interpreting atomic spectra using a quantum model of emission and absorption of radiation*, Phys. Rev. Phys. Educ. Res. **12**, 010132 (2016).
- [77] Escudero, C., Jaime, E. A. and González, S. B. *Hacia la conciencia cuántica a partir del efecto fotoeléctrico*, Enseñanza de las Ciencias **34**, 183-200 (2016).
- [78] Kohnle, A., Douglass, M., Edwards, T. J., Gillies, A. D., Hooley, C. A. and Sinclair, B. D., *Developing and evaluating animations for teaching quantum mechanics concepts*, Eur. J. Phys. **31**, 1441-1455 (2010).
- [79] Domingui, L., *Física moderna no ensino médio: com a palavra os autores dos livros didáticos do PNLEM*, Revista Brasileira de Ensino de Física **34**, 2502 (2012).
- [80] Fanaro, M. A., Arlego, M. and Otero, M. R., *The double slit experience with light from the point of view of Feynman's sum of multiple paths*, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**, 2308 (2014).
- [81] Simon, F. O., Nogueira, R. N. and Vicentin, F. C., *Avaliação de livros de divulgação científica acerca da mecânica quântica*, Revista Brasileira de Ensino de Ciência & Tecnologia **7**, 40-53 (2014).
- [82] 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).
- [83] Lautesse, P., Valls, A. V., Ferlin, F., Héraud, J.-L. and Chabot, H. *Teaching quantum physics in upper secondary school in france: 'quanton' versus 'wave-particle' duality, two approaches of the problem of reference*, Sci. Educ.-Netherlands **24**, 937-995 (2015).
- [84] Pinheiro, L. A., *A câmara de nuvens: uma abordagem integrada entre a Física Clássica e a Física Moderna*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **32**, 517-528 (2015).
- [85] Gilmore, R., *Alice no País do Quantum: a física quântica ao alcance de todos*, (Zahar, São Paulo, 1998).
- [86] Souza, A. R. and Neves, L. A. S., *O livro paradigmático no ensino de Física – uma análise fabular, científica e metafórica da obra Alice no País do Quantum: a física quântica ao alcance de todos*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**, 1145-1160 (2016).
- [87] Silva, J. R. N., Fusinato, P. A., Lino, A. and Araya, A. M. O., *Avaliação de um grupo de formação continuada de professores de Física na perspectiva da investigação de necessidades formativas*, Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia **5**, 1-15 (2012).
- [88] Sabino, A. R. and Pietrocola, M., *Saberes docentes desenvolvidos por professores do ensino médio: um estudo de caso com a inserção da física moderna*, Investigações em Ensino de Ciências **21**, 200-216 (2016).