

Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009

Glauco Cohen Ferreira Pantoja

Marco Antonio Moreira

Victoria Elnecave Herscovitz

Resumo

Apresentamos os resultados de uma revisão da literatura sobre a pesquisa em Ensino de Mecânica Quântica (MQ). A classificação adotada para os trabalhos foi inspirada nas de Ostermann e Moreira (2000) e de Greca e Moreira (2001), chegando a cinco grupos: propostas didáticas, implementações de propostas didáticas, estudos de concepções, análise curricular e críticas aos cursos introdutórios de MQ e análise teórica/epistemológica. Verificou-se um aumento progressivo no número de publicações de trabalhos na área.

Palavras-chave: Ensino de Física, Mecânica Quântica, Revisão de Literatura.

Abstract

A review of the literature of research on the teaching of Quantum Mechanics from 1999 to 2009

We present here the findings of a review of the literature related to research on the teaching of Quantum Mechanics (QM). The classification we used was based on the ones by Ostermann and Moreira (2000) and Greca and Moreira (2001) and it ended up arranged in five groups: didactic proposals, implementation of didactic proposals, studies on students' conceptions, curriculum analysis and criticisms of introductory QM courses, and theoretical/epistemological analysis. We verified a progressive increase in the number of papers published in this area.

Keywords: Physics teaching, Quantum Mechanics, Review of Literature.

Introdução

A Mecânica Quântica (MQ) é parte da Física que provocou uma revolução científica na área de estudo referenciada durante o século passado, porém ainda hoje há dificuldade de inseri-la nos currículos de Ensino Médio. Têm-se verificado, ademais, entraves na facilitação da apropriação deste conteúdo por parte dos alunos. Por outro lado, ao mesmo tempo em que há obstáculos cognitivos, sociais e mesmo institucionais para o seu ensino, a MQ provê um amplo campo de pesquisa no que diz respeito aos processos de ensino-aprendizagem e avaliação que aos poucos vem sendo desbravados.

No intuito de complementar as revisões de literatura de Ostermann e Moreira (2000) e Greca e Moreira (2001), apresentando o panorama da pesquisa em Ensino de Mecânica Quântica, realizamos uma revisão dos trabalhos publicados em revistas de Ensino de Física/ Ciências durante o período de 1999 a 2009, cujas classificações segundo o *qualis* da CAPES, no ano de 2009, possuíam índices A1, A2, B1 e B2. Consultamos os seguintes periódicos: *Science Education*, *Science and Education*, *Latin American Journal of Physics Education*, *American Journal of Physics*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, *Cognition and Instruction*, *Computers and Education*, *Enseñanza de las Ciencias*, *International Journal of Science Education*, *Investigações em Ensino de Ciências*, *Journal of Computer Assisted Learning*, *Journal of Research on Science Education*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, *Research in Science Education*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Revista de Enseñanza de la Física*, *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, *Research in Science and Technological Education*, *Ciência e Educação e Physics Education*. Foram consultadas todas as edições do período mencionado e a escolha dos artigos foi feita mediante a leitura de seus resumos.

O presente trabalho está vinculado à dissertação de Mestrado de um dos autores (Pantoja, 2011), intitulada *Sobre o Ensino do Conceito de Evolução Temporal em Mecânica Quântica*. Conforme afirmam Ostermann e Moreira (2000) e Greca e Moreira (2001), o conhecimento produzido sobre a temática de pesquisa em Ensino de Física Moderna/Mecânica Quântica era incipiente até os anos 2000/2001 se comparado com o produzido pela pesquisa em Ensino de Física Clássica (Mecânica Clássica, Eletromagnetismo, Termodinâmica). Consideramos, portanto, a relevância de um estudo complementar aos supracitados descrevendo como evoluiu o panorama do conhecimento produzido nessa linha de pesquisa na última década, tanto a mérito de enquadramento do trabalho de dissertação no contexto da pesquisa como para apresentação aos pares, do estado da arte desta linha de investigação.

A literatura em periódicos especializados em Ensino de Ciências/Física está recheada de artigos associados à MQ, no entanto, o objeto da pesquisa foi a seleção de trabalhos específicos do Ensino da Mecânica Quântica. Isto envolveu a categorização destes trabalhos e, portanto, muitos bons trabalhos desenvolvidos, que não estavam associados à temática proposta, foram desconsiderados.

A primeira categoria eliminada do estudo foi por nós intitulada “artigos de História e Filosofia da Ciência”. Eliminamos vários artigos deste tipo, pois tratavam de discussões histórico-epistemológicas sobre o conteúdo de MQ como um fim em si mesmo. O objetivo último dos artigos não era a instrução de um grupo escolar (de qualquer nível acadêmico), mas antes a discussão de aspectos ligados à Filosofia da Ciência, incluindo o conteúdo. Contribuições deste tipo são relevantes para a área, mas não revelam aspectos específicos e diretos para a Aprendizagem ou para o Ensino do conteúdo e, portanto, em nossa classificação enquadram-se como trabalhos de desenvolvimento.

A segunda categoria eliminada foi intitulada “artigos sobre Física Quântica”. Vários artigos foram excluídos da revisão, pois tratavam sobre a resolução de um problema nunca antes feita ou sobre um determinado conteúdo como um fim em si mesmo, ou seja, sem finalidade instrucional. Discussões conceituais sem fim instrucional também se enquadraram neste grupo: elas são importantes é meramente a discussão do conteúdo.

A terceira categoria eliminada foi intitulada “ênfase em metodologia específica de Ensino”. Poucos artigos usavam o conteúdo de MQ como segundo plano no processo instrucional, ou seja, somente como meio de avaliar o funcionamento de uma metodologia específica, generalizando os resultados facilmente para qualquer outra área da Física, como a Mecânica, por exemplo. Os artigos enquadrados nesta categoria apresentavam baixa interação entre o conteúdo específico e a metodologia específica de ensino, isto é, alguns dos trabalhos revelariam resultados semelhantes se aplicados a qualquer outro conteúdo de Física, pois as conclusões obtidas eram independentes do conteúdo adotado.

O quarto critério eliminatório foi denominado “artigos sugerindo confecção de experimentos”. Foram eliminados alguns artigos narrando construção de experimentos em MQ. Estes experimentos são importantes, porém enquadram-se como trabalhos de desenvolvimento e não de pesquisa. A sugestão de uma oficina enquadrando estes experimentos de uma forma a compor uma intervenção didática, enquadrar-se-ia como proposta didática (não implementada). Um roteiro de construção de experimento enfatiza a construção deste e não um “guia” de como implementá-lo dentro de um contexto de Ensino.

O quinto critério de eliminação foi denominado “especificidade de tópicos”. Excluímos tópicos como supercondutividade e partículas elementares por serem muito específicos e por não haver uma quantidade relevante de trabalhos cobrindo estes conteúdos. O conteúdo foi

classificado, basicamente, dentro de três categorias (sugerimos apreciação da nota de rodapé 1): Teoria Quântica Moderna de Sistemas Simples (Integrais de caminho, Física Nuclear e Radiação, Estrutura da Matéria, Problema da Medida, Evolução Temporal, Interpretações da Mecânica Quântica, Princípio da Incerteza, Orbitais Quânticos), Antiga Mecânica Quântica de Sistemas Simples (Átomo de Bohr, Efeito Fotoelétrico, Efeito Compton, Radiação do Corpo Negro), Analogias da Física Clássica ondulatória com a Física Quântica (Difração de Elétrons, Interferômetro de Mach-Zender).

Baseados em Ostermann e Moreira (2000) e Greca e Moreira (2001) elaboramos cinco grandes grupos para classificação dos artigos, a saber, *propostas didáticas, implementações de propostas didáticas, análise curricular e crítica a cursos de MQ, estudos de concepções e análise teórica/epistemológica*. Na sequência, apresentamos uma breve descrição por categorias dos artigos consultados.

Greca e Moreira (2011) apresentam um extenso trabalho de revisão de literatura no qual discutem a produção de conhecimento em periódicos nacionais e internacionais da área de Ensino de Ciências/ Ensino de Física e nesta pesquisa classificam os artigos por eles selecionados em três grandes grupos, a saber, *concepções dos estudantes acerca do conteúdo de Mecânica Quântica, trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica e Propostas de inovações didáticas*.

A categoria de concepções dos estudantes acerca do conteúdo de MQ cobria estudos nos quais eram analisadas as representações mentais construídas pelos estudantes sobre o conteúdo de MQ. Tal categoria foi incluída em nosso trabalho de revisão de literatura, pois a identificação de concepções prévias é de suma importância tanto para o desenvolvimento da pesquisa em ensino como para o desenvolvimento de novas estratégias instrucionais que visem à interação entre o conteúdo a ser ensinado e o conhecimento prévio na estrutura cognitiva do estudante (Ausubel, 2000).

A categoria de trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de MQ é auto-explicativa e mostra grande relevância na identificação de problemas em abordagens instrucionais. Estes trabalhos servem de indicadores de possíveis falhas ocorrentes em processos de Ensino. Elaboramos esta categoria incluindo as *análises curriculares*, por as consideramos incursões no mesmo terreno, isto é, trabalhos semelhantes buscando a melhor organização didático-curricular para o ensino de MQ.

A categoria de propostas de inovações didáticas apresenta discussão de encaminhamentos, em sala de aula, de novas abordagens para melhor focar o conteúdo de MQ. Esta categoria é relevante no que tange à informação de novos

trabalhos na área de Ensino de Mecânica Quântica e à sugestão do teste destas unidades didáticas.

Ostermann e Moreira (2000), dentre as seis categorias apresentadas, trazem duas que complementam, de certa forma, as três categorias de Greca e Moreira (2001). Estes grupos são: *propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem* e *questões metodológicas, epistemológicas, históricas referentes ao ensino de Física Moderna e Contemporânea*.

O primeiro dos grupos, incluindo propostas testadas em sala de aula com apresentação de resultados de aprendizagem, abordado no trabalho sob o rótulo *implementação de propostas didáticas*, é relevante no sentido de que traz resultados de abordagens efetivamente testadas ressaltando êxitos e dificuldades ocorrentes no processo instrucional.

O segundo grupo, incluindo questões metodológicas, epistemológicas, históricas referentes ao ensino de Física Moderna e Contemporânea, assimilado ao nosso trabalho sob a etiqueta *análise teórica e epistemológica*, sofreu uma modificação para incluir trabalhos preocupados em discutir aspectos teóricos (à luz de uma teoria de aprendizagem) e epistemológicos (à luz de uma dada epistemologia) acerca de tópicos a serem introduzidos no Ensino de Mecânica Quântica com fins instrucionais diretos.

Tal categorização não é a única possível e foi assim estabelecida em base nestes trabalhos anteriores que demonstram rigor e qualidade no processo de pesquisa, a nosso ver.

É necessário esclarecer, todavia, que há, também, trabalhos de teses e dissertações associados ao Ensino de Mecânica Quântica, bem como trabalhos apresentados em congressos relevantes à área de Ensino de Física. A ênfase desta literatura não foi explorada, pois preocupamo-nos prioritariamente com o conhecimento produzido em periódicos, nesta pesquisa.

Na sequência adentraremos a revisão da literatura realizada nos periódicos supracitados.

Propostas didáticas

Neste grupo incluímos os artigos apresentando uma organização de conteúdo exposta em forma de sugestão de apresentação em sala de aula. Discussões conceituais sobre algum tópico específico de Física com o mesmo fim também foram incluídas na categoria.

Michellini et al. (2000) apresentam uma proposta didática de inserção da MQ via formulação de Dirac. Os conteúdos a guiar esta inserção seriam a polarização linear de fótons em interação com polaróides e cristais birrefringentes, enfatizando a fenomenologia dos

experimentos citados. Os pesquisadores descrevem o formalismo e o quadro conceitual a ser introduzido e narram uma breve tentativa de implementação da proposta, porém a ênfase do trabalho é a proposta em si. O conteúdo de MQ incluído na proposta compreende os conceitos de amplitude de probabilidade, superposição de estados, ortogonalidade, medição, observáveis compatíveis, entre outros tópicos importantes. Os autores afirmam ainda haver um fator facilitador nesta proposta, a saber, a possibilidade da comparação do aspecto conceitual a experimentos reais envolvendo os polaróides e os cristais birrefringentes.

Cavalcante e Tavolaro (2001) descrevem uma proposta de cinco atividades de baixo custo para a inserção de tópicos de Física Moderna no Ensino Médio como, por exemplo, o comportamento corpuscular da radiação, interferência, difração e dualidade onda-partícula. As atividades compõem uma oficina e estão organizadas de forma a tratar experimentalmente os conceitos de óptica ondulatória (na primeira etapa da oficina) e os associados ao comportamento corpuscular da radiação (na segunda etapa da oficina), culminando em um experimento sobre o efeito fotoelétrico. A proposta surgiu a partir da análise de algumas concepções de alunos sobre ondas (gestos de ondas se propagando; ondas de rádio) e sobre partículas (localizáveis; massivas; concretas) levantadas a partir de perguntas feitas aos alunos participantes das oficinas.

Abd-El-Khalick (2002) relata a construção de um “experimento de Rutherford” embasado na premissa de o mesmo poder ser uma ponte para a introdução de uma nova visão acerca da Natureza da Ciência aos alunos e estimula a interposição de discussões de conteúdo e de história-epistemologia da Ciência para supor restrições impostas sobre os professores como, por exemplo, o tempo disponível para instrução. O experimento envolve material de baixo custo como caixas e bolas de pingue-pongue e consiste em um problema de espalhamento clássico. Na atividade o professor pode discutir diversos aspectos associados à natureza da Ciência como as inferências e o processo experimental. O pesquisador apresenta, também, evidências de que a manipulação da ferramenta descrita, em sala de aula, estimulou os alunos a uma mudança de visão epistemológica acerca da natureza da Ciência a partir da abordagem epistemológica explícita.

Budde et al. (2002a) propõem a ferramenta didática “electronium” para o ensino de conceitos de MQ a partir das concepções prévias dos estudantes. O modelo é descrito como uma substância fluida distribuída no espaço. Os autores apresentam as limitações do modelo na explicação do comportamento das forças eletrostáticas, mas garantem que o modelo alcança a “ressonância cognitiva” com as estruturas cognitivas dos estudantes. Os autores justificam a introdução deste modelo recorrendo às dificuldades de aprendizagem emergentes na instrução através do modelo probabilístico tradicional como, por exemplo, o entendimento de que elétrons estão em movimento no átomo e a estabilidade da concepção do modelo planetário do átomo. Os pesquisadores afirmam, ademais, que os estudantes concebem: o elétron como uma partícula

clássica; o processo de medição semelhante ao processo de medição clássico; a probabilidade no sentido subjetivo do termo, ou seja, derivada de erros de medição.

Zollman et al. (2002) propõem uma série de materiais instrucionais para o ensino de MQ que podem ser utilizados ao longo do primeiro ano do curso de Física através da metodologia *hands-on* (em tradução livre, “mão na massa”, ou seja, aprender fazendo), enfocando a fenomenologia da Física Quântica e sua utilidade prática em detrimento do formalismo matemático como, conforme os autores, é usualmente feito. Os pesquisadores descrevem também a possibilidade de transferência de alguns materiais da intervenção e da abordagem básica a cursos de nível mais alto. As atividades propostas são do tipo computacional envolvendo os seguintes temas: níveis e espectros de energia, espectroscopia e emissão, bandas de energia em sólidos, funções de onda. Os autores narram resultados da implementação do projeto proposto, realizada por professores do Ensino Médio e Universitário dos EUA, argumentando através destes a potencialidade do projeto.

Peduzzi e Basso (2005) discutem a avaliação de um texto sobre o átomo de Bohr, escrito para professores do Ensino Médio. O texto busca fazer a introdução do conteúdo através da filosofia da ciência lakatosiana como uma alternativa mais adequada ao empirismo-indutivismo, concepção que, segundo os autores, está implícita na grande maioria dos livros didáticos do Ensino Médio. Este texto enfatiza a fase progressiva do programa de pesquisa do átomo de Bohr, relativa à construção dos primeiros modelos que o levaram à quantização da energia para átomos de massa finita com um elétron. O material foi exposto à análise de estudantes de licenciatura, mestrandos e doutorandos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os analistas se posicionaram como favoráveis ao material e sugeriram várias modificações que seriam incorporadas ao mesmo.

Fanaro e Otero (2007; 2009) e Fanaro et al. (2008) descrevem uma proposta didática para o ensino de conceitos de MQ tais como: distribuição de probabilidades, sistema quântico, amplitude de probabilidades, constante de Planck, etc., através da introdução da idéia qualitativa das integrais de caminho de Feynman. As pesquisadoras propõem o seguimento do conteúdo de forma contrária à abordagem histórica e como complementar ao formalismo canônico. Para este fim, usam a ferramenta Modellus para a modelagem de alguns experimentos quânticos como: o experimento da dupla fenda (como uma das situações a dar sentido aos conceitos), a partir da qual são discutidos o comportamento corpuscular do elétron, o comportamento ondulatório, o limite clássico-quântico. As autoras destacam, ainda, a importância de se abordar o conteúdo através de situações-problema exclusivamente quânticas.

Johansson e Milstead (2008) discutem tópicos importantes relativos ao conteúdo do Princípio da Incerteza de Heisenberg (de posição-momentum e de energia-tempo) e sugerem a inserção deste conteúdo para estudantes de Ensino Médio (*high-school students*) através do experimento de dupla fenda para elétrons, para que depois se apresentem vários outros tópicos

(e as explicações para os fenômenos envolvidos pelos conteúdos) sob o olhar desse princípio como, por exemplo: a difração de fenda simples, a energia de ponto zero, a troca de partículas e o decaimento alfa. Nas conclusões os autores sugerem como pode ser interpretado o princípio de forma coerente com a MQ (ao invés das imagens semiclássicas fornecidas por muitos livros didáticos) e a introdução deste princípio como base para o início do estudo do comportamento peculiar dos objetos quânticos.

Goff (2008) propõe um jogo denominado *quantum tic-tac-toe* para a introdução de conceitos de MQ como: estado, superposição de estados, colapso, não-localidade, emaranhamento, princípio da correspondência, interferência quântica e decoerência. O jogo foi desenvolvido como uma metáfora para a natureza contra-intuitiva da superposição de estados exibida pelos sistemas quânticos sem o uso de matemática. O jogo é baseado no jogo clássico *tic-tac-toe* (jogo da velha) e consiste na adição de uma regra de superposição ao original, isto é, pode-se associar simultaneamente o movimento a dois quadrados e no ato de medição, somente um dos quadrados é marcado de forma que o jogo se parece com um jogo da velha duplo, ou seja, o conceito de superposição diz respeito à existência simultânea de dois valores para uma dada variável dinâmica.

É possível notar pontos similares em alguns dos trabalhos no que diz respeito aos seguintes critérios: uso de referencial teórico, propostas de intervenção no Ensino Superior (Graduação e Pós-Graduação), propostas de intervenção no Ensino Médio, uso de atividades de experimentação, ênfase em conteúdos de Teoria Quântica Moderna¹, ênfase em conteúdos novos² e propostas de mudança em determinado conteúdo.

Na primeira categoria foram registrados quatro trabalhos fundamentados em referenciais de aprendizagem/epistemologia para construção de unidade didática (Peduzzi e Basso, 2005; Fanaro e Otero, 2007; Fanaro e Otero, 2009; Fanaro et al., 2009), um número baixo considerando o número de trabalhos analisados (11 artigos), pois três foram escritos pelos mesmos autores. No que tange ao número de propostas a serem empregadas no Ensino Superior, verificou-se a existência de dois trabalhos (Zollmann et al., 2002; Peduzzi e Basso, 2005) e com respeito ao número de propostas construídas no intuito de serem implementadas no Ensino Médio, foram registradas nove (Michelini et al., 2000; Cavalcante e Tavolaro, 2001; Abd-El-Khalick, 2002; Budde

¹ O critério para classificação de um conteúdo como Teoria Quântica Moderna ou Antiga Mecânica Quântica advém da necessidade de se distinguir entre conteúdos que partem de premissas semi-clássicas (como quantização do momentum angular ao mesmo tempo em que se consideram trajetórias definidas) e conteúdos que partem da forma elaborada da Mecânica Quântica não-relativística.

² Conteúdos usualmente não tratados em um determinado nível de ensino.

et al., 2002a; Fanaro e Otero, 2007; Fanaro et al., 2008; Johansson e Milstead, 2008; Goff, 2008 e Fanaro e Otero, 2009), sendo três muito semelhantes por terem sido escritas pelos mesmos autores.

Em relação ao número de publicações cujas propostas enfatizam o uso de atividades de experimentação (com equipamentos de alto e baixo custo), foram registrados três trabalhos (Michelini et al., 2000; Cavalcante e Tavolaro 2001 e Abd-El-Khalick, 2002), o que vai contra a tese fundamentada no senso comum de que é impossível realizar-se experimentos com Física Moderna no Ensino Médio, embora pareça mais complicado que em Mecânica Clássica ou Termodinâmica, por exemplo. Outro ponto importante é o aspecto inovador das propostas, pois oito das 11 enfatizam conteúdos de Teoria Quântica Moderna (TQM) (Michelini et al., 2000; Budde et al., 2002; Zollmann et al., 2002; Fanaro e Otero, 2007; Fanaro et al., 2008; Goff, 2008; Johansson e Milstead, 2008; Fanaro e Otero, 2009), enquanto três apresentam ênfase em conteúdos relativos à Antiga Mecânica Quântica (AMQ) (Cavalcante e Tavolaro, 2001; Abd-El-Khalic, 2002 e Peduzzi e Basso, 2005). Tal ponto deve ser ressaltado, pois conforme será visto na categoria de concepções de estudantes, muitas concepções alternativas em MQ guardam semelhanças com modelos que vigiam durante o período da denominada Antiga Mecânica Quântica. Em comparação com a numeração levantada por Greca e Moreira (2001), verificamos uma queda relativa no número de propostas didáticas na literatura. Esta categoria não teve maior número de artigos computados, dado que contraria, neste período, o fato apresentado por Greca e Moreira (ibid). Isto representa, em linhas gerais, um avanço em relação ao período de 1970-1999, pois atualmente, as propostas parecem estar sendo efetivamente testadas em maior número. Em outras palavras, é muito provável que as conjecturas estejam sendo postas à prova. Além disso, como os conteúdos estão mais voltados à introdução da Teoria Quântica Moderna no Ensino Médio, é possível que os estudos cobrindo conteúdos acerca da Antiga Mecânica Quântica estejam sendo esgotados.

Implementações de propostas didáticas

Nesta categoria foram enquadrados os artigos sobre implementações de propostas didáticas em sala de aula. Artigos incluindo a proposta didática no corpo do texto, mas apresentando resultados experimentais que justificam a ênfase na aplicação de uma sugestão didática à sala de aula, foram classificados nesta categoria.

Pinto e Zanetic (1999), embasados na epistemologia de Gaston Bachelard, prepararam uma intervenção didática em forma de mini-curso para alunos de uma escola pública em Guarulhos, São Paulo. O mini-curso teve a duração de 12 horas e versou principalmente sobre a descrição histórica da construção do conceito de Luz em Física (até a MQ, com a introdução do modelo fotônico) e sua avaliação envolveu três etapas, a saber, o esboço de um perfil epistemológico

através de um teste, uma etapa de trabalhos culturais e a elaboração de um relatório final. Através de uma feira de ciências e do relatório final, os alunos deixaram suas impressões e comentários relativos ao mini-curso, tais como: dificuldade de leitura do material, falta de ênfase na parte experimental, prejuízo no conteúdo em virtude do descarte da matemática e interesse pela possibilidade de múltiplas interpretações. Estas críticas foram usadas no processo de reconstrução da unidade de ensino.

Müller e Wiesner (2001) apresentam os resultados de um curso (embasado em pesquisa) no qual aspectos conceituais da MQ são ensinados em um nível introdutório no Ensino Superior. Uma das metodologias de ensino usada no curso foca o contexto dos laboratórios virtuais que, segundo os autores, fazia os estudantes perceberem as grandes diferenças entre os fenômenos clássicos e quânticos. No intuito de contrapor as concepções alternativas dos alunos, fundamentadas na MC, os pesquisadores decidiram enfatizar aspectos da MQ que segundo eles diferiam radicalmente dos da MC. Outra vertente do enfoque lançou o olhar sobre a conceitualização em um primeiro momento (com o auxílio do uso de experimentos virtuais) e a formalização do conteúdo em uma segunda etapa. O processo de ensino seguiu, também, um currículo em espiral através da introdução do conceito de fóton, seguida de uma discussão qualitativa do conceito de dualidade onda-partícula, da interpretação probabilística e noções sobre propriedades dinâmicas na MQ. Na segunda fase da espiral, usaram os elétrons no experimento de dupla fenda e introduziram qualitativamente a interpretação probabilística com funções de onda, tornando possível a introdução do conceito de superposição de estados. Ao final do curso foram discutidos também aspectos como redução de estado, complementaridade, o experimento de pensamento do gato de Schrödinger e o fenômeno da decoerência. Os autores informam terem sido positivos os resultados e mostram que os alunos extrapolam indevidamente muitas concepções da Física Clássica para a Física Quântica.

Bao e Redish (2001) desenvolveram uma série de tutoriais para o ensino de Física Moderna a estudantes de engenharia. Os tutoriais tratam do conceito de probabilidades e associados, como distribuição e densidade de probabilidade, que segundo os autores, são intrínsecos à MQ e não são entendidos de forma correta pelos estudantes mesmo em Física Clássica. Para avaliar os alunos, os pesquisadores usaram dois testes do tipo “quiz” (múltipla escolha), um teste do tipo exame e entrevistas com 16 indivíduos participantes da investigação. Os pesquisadores afirmam ter detectado, nas entrevistas, visões estocásticas de probabilidade, isto é, determinísticas. Os autores afirmam, ainda, que os estudantes nunca haviam usado probabilidade para estudar um sistema físico. Os pesquisadores afirmam que muitos conceitos supostos óbvios pelos professores que ministram usualmente as disciplinas, na verdade não o são como, por exemplo, o entendimento de diagramas de energia.

Budde et al. (2002b) narram os resultados da aplicação do modelo “electronium”, proposto como ferramenta didática em outro trabalho do grupo (Budde et al. 2002a). Neste artigo, os pesquisadores analisam tanto o poder empírico da ferramenta, verificado na realização de um estudo de caso em profundidade envolvendo dois estudantes, como a pertinência das premissas de ensino adotadas na pesquisa. Os autores afirmam terem sido bons os resultados da implementação pois, conforme esperado, o modelo gerou uma espécie de “ressonância cognitiva” com a estrutura cognitiva dos estudantes, principalmente no que tange ao aspecto fluido do electronium (estrutura interna do modelo e não sua natureza) e ao fato de os alunos concordarem que os átomos em estados estacionários estão em repouso. O câmbio de premissas de ensino se baseou no fato de a continuidade dos fluidos (conteúdo analógico) não necessariamente levar à noção de o “electronium” também ser contínuo em sua natureza (não composto de partículas).

Kalkanis et al. (2003) implementaram um modelo de instrução baseado na mudança conceitual radical, fundamentado na epistemologia de Thomas Kuhn, para ensinar MQ. O estudo foi realizado com 200 estudantes de ensino superior, 98 destes formando o grupo experimental e 102 o grupo de controle. Os estudantes eram oriundos de três públicos distintos (igualmente distribuídos nos grupos de controle e experimental): alunos do segundo ano do curso de Pedagogia, alunos do departamento de História e Filosofia da Ciência e professores do Ensino Médio. Os sujeitos foram distribuídos de forma aleatória; os pesquisadores supuseram igualdade nas amostras e, seguiram, então, à etapa de análise do conhecimento prévio dos estudantes através de entrevistas semi-estruturadas realizadas com integrantes do grupo experimental escolhidos aleatoriamente e de um questionário ministrado ao grupo de controle, embasado nos resultados da entrevista anteriormente citada. O conhecimento prévio dos estudantes guiou a escolha do tópico da instrução implementada, a saber, o modelo atômico, pois as concepções dos alunos a respeito deste tema se configuraram como obstáculos epistemológicos. Os estudantes acreditavam ser o modelo cientificamente aceito, o devido a Niels Bohr e atribuíam igualdade a objetos clássicos e objetos quânticos, evidenciando uma justaposição de ideias entre os dois domínios. Foram ministradas 12 aulas de 45 minutos sobre o tema. O embasamento na epistemologia kuhniana fundamentou o tratamento da MC e da MQ como incomensuráveis e, portanto, como radicalmente distintas. Ao final de cada sessão foram realizadas novas entrevistas semi-estruturadas e ao término da implementação foi repassado o (mesmo) teste a ambos os grupos. Os autores afirmam que a maioria dos alunos do grupo experimental apresentou uma visão de mundo mais próxima da científica em comparação com a evidenciada anteriormente.

Greca e Herscovitz (2002, 2005) descrevem a implementação de uma proposta didática para o ensino de conceitos como: superposição de estados, princípio da incerteza, dualidade onda-partícula, medição, entre outros. O estudo foi feito com 89 estudantes de nível superior e foi realizado à luz da teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird. Os 89 alunos foram

distribuídos em quatro grupos, sendo dois de controle (envolvendo 20 alunos) e dois experimentais (composto pelos 69 alunos restantes). Uma investigação prévia com outros 26 estudantes submetidos a uma abordagem dita tradicional levou as autoras à construção de uma unidade didática de 24 horas ministrada aos 69 estudantes dos grupos experimentais. Além do procedimento de análise qualitativa para análise dos dados, foram realizados testes de associação de conceitos, um pré-teste e um pós-teste que, segundo as autoras, mostraram um avanço significativo para os grupos experimentais. A afirmação é explicitada pela classificação dos estudantes em quatro núcleos de modelos mentais (objeto quântico, objeto quântico incipiente, clássico com ingredientes quânticos e indeterminado). Os alunos do grupo experimental foram enquadrados, em sua maioria (65%), nos dois núcleos mais próximos do conhecimento científico relativo à MQ (objeto quântico, objeto quântico incipiente). Greca e Freire Jr. (2003), embasados em filosofia realista (que atribui realidade ao vetor de estado) analisam também os estudos mencionados.

Ostermann e Ricci (2004; Ostermann et al., 2008) narram o resultado da aplicação de uma proposta didática voltada para a mudança conceitual de professores em formação continuada. A proposta didática foi estruturada em torno da diferenciação entre conceitos da Física Moderna e da Física Clássica. Na abordagem, não foram usados modelos semi-clássicos, pois, de acordo com os autores, isto dificultaria o processo de evolução conceitual. Foi usado na intervenção um interferômetro virtual de Mach-Zender no tratamento do conceito de interferência e na introdução de conceitos da MQ. Os pesquisadores verificaram diferenças estatisticamente significativas (resultados positivos) entre o pré-teste e o pós-teste a um nível $p < 0.001$ e constataram, ademais, evoluções nas concepções dos estudantes. Os mesmos autores (Ostermann e Ricci, 2005), discutem a implementação de uma proposta didática que tem como premissa a minimização do uso do formalismo matemático e maximização do conteúdo conceitual, a um grupo de 19 professores do Ensino Médio. O curso teve 18 encontros (de três horas-aula cada um) e seu conteúdo versou sobre temas como diferenças entre os objetos clássicos e quânticos, analogias com a óptica ondulatória, efeito fotoelétrico, espalhamento Compton, difração e interferência de feixes de partículas. A estrutura da disciplina foi dividida em três unidades, a saber, a conceitual (cujos resultados são expostos no trabalho referenciado), a formal e a de aplicações. A ênfase do curso residiu no uso de experimentos virtuais (o experimento de Mach-Zender, por exemplo) como ferramenta de exploração das características peculiares dos sistemas quânticos. De acordo com os autores, os resultados obtidos revelam uma melhora significativa nas respostas formuladas.

Greca e Herscovitz (2005; Greca et al., 2001; Greca e Herscovitz, 2001) discutem a aplicação de uma proposta didática cujo objetivo é o ensino de conceitos como o de estado de um sistema

físico, princípio de incerteza, superposição linear de estados, resultados de medições e distribuição de probabilidades, de forma conceitual-fenomenológica. O referencial teórico usado no estudo é o da teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird. O estudo envolveu 94 estudantes (três turmas de cursos de engenharia de uma disciplina de Física Geral IV) que formaram o grupo experimental (GE) e 24 outros estudantes, sendo dez de uma turma de Física Geral IV (FG-IV) também de engenharia, dez de uma turma da disciplina de Introdução à Mecânica Quântica (IMQ) e quatro de um grupo que já havia cursado MQ I do curso de Física, formando o grupo de controle (GC). O GE participou de uma intervenção didática de 24 horas-aula, assim como os alunos de FG-IV do GC, enquanto os alunos da IMQ estiveram no curso regular de 60 horas-aula. A metodologia de avaliação incluiu o uso de pré-teste/pós-teste e um teste de associação de conceitos. Como resultado as autoras afirmam que 25% dos alunos do grupo experimental se enquadraram em um núcleo que usava os conceitos de MQ de forma desejável, 40% dos alunos compunham um núcleo que usava alguns conceitos fundamentais da MQ de forma incompleta, 18% usavam conceitos híbridos, ou seja, caracterizados por atributos tanto da MQ, como da MC (os conceitos de MQ foram captados de forma distorcida) e 17% não responderam às perguntas de forma coerente, compondo um núcleo indeterminado.

Barros e Bastos (2007) publicaram os resultados da introdução do corolário do ciclo da experiência kellyana a uma proposta didática envolvendo o conceito de difração de elétrons. A proposta, consistente de cinco etapas, distribuídas ao longo de dez encontros de aproximadamente duas horas-aula cada, foi implementada em Campina Grande (Paraíba), com um grupo de 15 alunos no qual parte cursava a disciplina de Física Moderna e parte a de Mecânica Quântica. Os autores aplicaram uma série de questionários e realizaram entrevistas como metodologia de pesquisa. A metodologia das aulas reuniu elementos experimentais (tipo experimento virtual) e aulas expositivas. Os autores detectaram dificuldades muito semelhantes tanto para alunos cursando a disciplina de Física Moderna (do currículo de licenciatura em Física) como para os que cursavam a disciplina de Mecânica Quântica (voltada ao bacharelado em Física). Foi evidenciada uma melhora na conceitualização dos alunos, pois após a implementação do ciclo da experiência kellyana, os alunos apresentaram melhor articulação entre as concepções corpuscular e ondulatória e atribuíam interpretação ao fenômeno de difração de elétrons.

McKagan et al. (2008) discutem a construção e implementação de uma unidade curricular para o ensino do efeito fotoelétrico. A unidade foi caracterizada pelo uso de simulações computacionais, aulas interativas com “*peer instruction*” e resolução de problemas (tanto conceituais quanto quantitativos). Os objetivos do curso eram: 1) induzir os alunos a prever corretamente os resultados de experimentos envolvendo o efeito fotoelétrico; 2) descrever como os resultados dos experimentos levaram ao modelo “fotônico” da luz. Os pesquisadores elaboraram duas questões para testar as metas e verificaram que 85% dos estudantes previram corretamente os resultados do efeito fotoelétrico, além de afirmarem serem corretas as

inferências feitas pelos estudantes, embora não conectadas às observações, fato que, para os pesquisadores, está associado a uma falta de raciocínio lógico relativo à produção de inferências a partir de observações.

Singh (2008b) discute o desenvolvimento e a avaliação de tutoriais interativos para o ensino de MQ. São apresentados os resultados de estudos de caso de cursos que usaram tutoriais interativos para ensinar três temas, a saber, evolução temporal, princípio da incerteza e o interferômetro de Mach-Zender. O estudo envolveu um pré-teste de detecção de dificuldades iniciais, a implementação dos tutoriais e um pós-teste seguido de entrevistas de uma hora e meia com seis estudantes voluntários (realizadas como uma análise de protocolo do tipo *“think aloud”* – pensando alto). Uma das importantes dificuldades dos estudantes descritas no estudo é a concepção de as funções de onda representarem somente estados estacionários. Quanto à eficácia do tutorial de ensino de evolução temporal, Singh (ibid) comenta ter havido melhora no aproveitamento dos estudantes (de 53% de acertos para 85% do pré-teste para o pós-teste). No que tange ao tutorial sobre o princípio da incerteza, o melhoramento foi de 42% de acertos para 83% (do pré-teste para o pós-teste). O tutorial relativo ao interferômetro de Mach-Zender teve resultado semelhante.

Sales et al. (2008) apresentam o resultado da implementação de uma proposta de um objeto de aprendizagem denominado pato quântico, um jogo metafórico para a aprendizagem do efeito fotoelétrico. A metáfora consiste na atribuição do papel dos elétrons de um dado átomo possível de ser escolhido a patos em movimento, do da radiação a uma arma cujo número de balas (metáfora para a intensidade da radiação) e velocidade (metáfora para a frequência da radiação) podem ser arbitrariamente escolhidos. Os pesquisadores realizaram um estudo com 32 estudantes do Ensino Médio em que concluíram que a atividade foi motivante e divertida para os alunos, porém não apresentaram qualquer conclusão direta acerca da aprendizagem, a não ser indicativos de que os alunos compreenderam a finalidade da mesma e de que qualitativamente engajaram-se na atividade.

Fanaro e Otero (2008; 2009) implementaram uma proposta didática sobre a formulação de integrais de caminho de Feynman para o Ensino Médio (registre-se que houve adaptações – transposição didática) embasada na teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud. O estudo foi realizado com 30 estudantes na faixa de 17-18 anos e a coleta de dados foi basicamente qualitativa com o uso de análise de protocolos, gravação de conversas entre os alunos, e outras fontes similares. Em outros trabalhos (Fanaro et al., 2007, Fanaro et al., 2009) os pesquisadores descreveram a proposta didática, motivo pelo qual discutiremos aqui somente os resultados da proposta neste momento. Um dos resultados, intuitivamente esperado, é o de o comportamento probabilístico do elétron ser um incômodo para os estudantes. Além disso, as pesquisadoras

detectam vários teoremas-em-ação, reformulados em termos de linguagem dos alunos, tais como: “se bolinhas são disparadas ao azar, a distribuição de probabilidades é uniforme” (Fanaro e Otero, 2008, p.314); “os elétrons têm uma característica especial: atravessar paredes” (op cit., p.316); “os elétrons são bolinhas muito pequenas” (ibid).

Krey e Moreira (2009a; 2009b) descrevem a implementação de uma proposta didática, embasada nas teorias de Ausubel e Vergnaud, sobre Física Nuclear e Radiação (Krey e Moreira, 2009a) e sobre Partículas Elementares (Krey e Moreira, 2009b) em uma disciplina de Estrutura da Matéria. O curso foi realizado em duas etapas, sendo a primeira classificada como tradicional (incluindo uma espécie de grupo de controle, com 28 alunos) e a segunda classificada como inovadora (incluindo uma espécie de grupo experimental, com 37 alunos) no ano seguinte. As aulas da segunda etapa foram baseadas em situações-problema, tanto teóricas, isto é, discussões dirigidas, como problemas de lápis-e-papel, ou procedimentais, que exigiam participação ativa dos alunos na execução das tarefas. Como instrumento comparativo entre os dois grupos, usou-se uma avaliação escrita, feita em duplas na primeira etapa e realizada individualmente na segunda. De modo geral os autores concluíram que houve evidências de aprendizagem significativa na segunda etapa, além de maior satisfação por parte dos alunos e detecção de possíveis invariantes operatórios (teoremas-em-ação e conceitos-em-ação) conflituosos com o conhecimento científico em ambas as etapas.

Carvalho Neto et al. (2009) implementaram uma proposta didática sobre a natureza preditiva da MQ e seu caráter intrinsecamente probabilístico a um grupo de dez alunos do terceiro ano do Ensino Médio baiano. A metodologia de pesquisa usada foi a observação participante, técnica bastante adotada na pesquisa em educação. Os autores estudaram as concepções de cinco estudantes de forma qualitativa, antes e depois de um mini-curso envolvendo os fundamentos da MQ. Este mini-curso teve a duração de 20 horas, sendo discutidos aspectos como o efeito fotoelétrico (focando nas semelhanças e diferenças com a radiação clássica), o átomo de Bohr (com a introdução da discretização do momentum angular), a dualidade onda-partícula (dando ênfase à complementaridade) e por fim as predições da teoria da MQ formulada entre 1925 e 1927. O estudo passou à segunda fase (consistindo na reformulação do primeiro mini-curso) envolvendo outros cinco estudantes no ano de 2005. Nesta etapa os conteúdos de discussão foram o experimento de dupla-fenda e o princípio da complementaridade, para induzir a percepção dos estudantes ao aspecto preditivo da MQ. Como conclusão do estudo, os autores afirmaram ter detectado evidência de aprendizagem significativa, associada à diferenciação do conceito de probabilidade presente na estrutura cognitiva dos estudantes (facilitando, assim, a interpretação correta do Princípio de Incerteza de Heisenberg), bem como a percepção da natureza preditiva da MQ, por parte dos alunos.

Pereira et al. (2009a) discutem a utilização de um interferômetro virtual de Mach-Zender para a introdução de conteúdos da Física Quântica como: dualidade onda-partícula, efeito

fotoelétrico, experimento de dupla fenda, interferômetro de Mach-Zender, entre outros. O estudo enfocou a análise do discurso de alunos da Licenciatura em Física ao interagir em grupo no laboratório virtual. Os pesquisadores apresentaram conclusões qualitativas a respeito do processo de negociação de significados, dentre as quais: um dos colegas assume a postura de parceiro mais capaz; existe um processo de organização da ação do locutor que ocorre internamente de forma similar à fala egocêntrica; a interanimação de vozes elicia uma construção colaborativa de significados de tal modo que, muitas vezes, fica inidentificável o autor de uma resposta ao problema. Desta forma, os pesquisadores tratam o interferômetro de Mach-Zender como um instrumento potencialmente facilitador da negociação de significados em MQ.

Em outro trabalho, Pereira et al. (2009b) discutem novamente a potencialidade do interferômetro de Mach-Zender para o ensino de conceitos de MQ. A abordagem foi caracterizada pela introdução de conteúdos através de analogias entre a MQ e a Física Ondulatória Clássica. A unidade didática é baseada em duas hipóteses de ensino, a saber, que a analogia deve facilitar a aprendizagem do princípio da correspondência (uso do limite clássico da MQ) e que o experimento de Mach-Zender deve facilitar o entendimento do problema do “caminho” seguido pelo fóton. Esta unidade didática foi implementada com 11 estudantes que, em grupos, analisavam o experimento de Mach-Zender (quatro grupos compostos por dois estudantes e outro composto por três). Como conclusões gerais do trabalho, os pesquisadores afirmam que: a sequência de atividades seguida pelo guia naturalmente levou os estudantes a estabelecer uma analogia entre Física Quântica e Óptica Ondulatória; muitos dos fenômenos observados na simulação computacional mostram o comportamento anormal do fóton, evitando a concepção errônea de os objetos quânticos serem vistos como ‘partículas clássicas’.

Asikanen e Hirvonen (2009) descrevem o desenvolvimento e a implementação de um curso de Física (do tipo *research-based*, em tradução livre, embasado em pesquisa) para professores em formação e em serviço (*pre-service e inservice teachers*) sobre o efeito fotoelétrico. A metodologia da pesquisa consistiu de um estudo de caso envolvendo 25 professores (oito em formação e 17 em serviço). A evolução na aprendizagem indicou que a abordagem pode ajudar os professores-aprendizes (*teachers-learners*) a ganhar profundidade no entendimento chave do conteúdo não só associado ao efeito fotoelétrico, mas a princípios quânticos gerais. A abordagem didática consiste de múltiplas metodologias de ensino, dentre as quais, a utilização de modelagem computacional, o enfoque na História e na Filosofia das Ciências e a atribuição do papel do professor como mediador de postura ativa dos estudantes.

Carr e McKagan (2009) realizaram um estudo na Escola de Minas de Colorado (EUA) usando inovações em aspectos como: conteúdo, livro-texto, métodos de ensino e ferramentas de avaliação. O conteúdo da abordagem enfatizou o progresso da MQ nos últimos cinquenta anos.

Para isto, os autores usaram na implementação da proposta didática, livros-texto tratando deste período da MQ (na primeira etapa da pesquisa usaram a obra de La Bellac e na segunda a de Gottfried e Yan), incorporaram uma variedade de técnicas de ensino baseadas em pesquisas em Ensino de Física e usaram ferramentas de avaliação eficazes na medição do efeito das reformas, segundo os autores. Como fruto da pesquisa apresentaram um questionário denominado *Graduate Quantum Mechanics Conceptual Survey* e os resultados da avaliação de outro teste prévio, o *Quantum Mechanics Conceptual Survey*. Os autores concluíram que a habilidade dos estudantes em resolver questões conceituais (do teste proposto) está altamente correlacionada à habilidade de resolver questões matemáticas acerca do tema e que, aparentemente, as disciplinas de MQ de graduação não facilitam o entendimento dos conceitos em nível de graduação.

O número de trabalhos nessa categoria foi de 25, o que corrobora a ideia de ter ocorrido crescimento no número de propostas didáticas efetivamente implementadas no contexto do Ensino de Mecânica Quântica. A maioria destas implementações ocorre, principalmente, no Ensino Superior, totalizando 21 trabalhos (os trabalhos descrevendo estudos no Ensino Médio são, pois, quatro: Pinto e Zanetic, 1999; Budde et al., 2002; Sales et al., 2008; Fanaro e Otero, 2008.) Ponto positivo é a grande quantidade de trabalhos a usar referenciais teóricos, seja de aprendizagem, seja de epistemologia, para a fundamentação das intervenções. 18 dos 25 trabalhos valem-se de fundamentação teórica para a construção da instrução.

A aula expositiva é a metodologia mais usada pelos autores para o desenvolvimento da instrução, tendo 12 dos trabalhos encabeçados pela metodologia. Outra metodologia de expressivo uso nas pesquisas é a de instrução via laboratórios virtuais, sendo esta explícita em seis dos 25 trabalhos. A combinação das duas metodologias mais usadas ocorre em três dos trabalhos e outras metodologias contabilizam quatro ocorrências (tutoriais, jogos, etc). A integração entre laboratórios virtuais e aulas expositivas no Ensino de Mecânica Quântica, revela-se, portanto, como um fértil campo de pesquisa na área.

Corroborando a hipótese apresentada na seção anterior, a saber, a de os conteúdos de AMQ terem sido menos explorados, encontramos somente três trabalhos enfatizando o assunto, enquanto maior parte dos (22) enfatiza a TQM (conforme formulada por Dirac, Heisenberg e Schrödinger, principalmente), porém tratando de conceitos distintos. Alguns trabalhos como o de Greca et al. (2001) e Singh (2008), por exemplo, estudam sob diferentes perspectivas, a aquisição de conceitos estruturantes da TQM, tais como, estado quântico, superposição de estados e evolução temporal, enquanto outros trabalhos enfocam conceitos mais específicos.

Estudos de concepções

Tal categoria inclui artigos tratando tanto sobre concepções de estudantes e professores acerca de conteúdos de Física Quântica, como sobre opiniões de professores acerca da relevância de conteúdos específicos desta área.

Concepções dos estudantes acerca do conteúdo de Física

Ireson (2000) narra a aplicação de um pré-teste e de um pós-teste a um grupo de 342 estudantes de um curso de Física do Ensino Médio de nível avançado (GCE), no qual aproximadamente metade dos estudantes ainda estudaria “fenômenos quânticos”. A metodologia de pesquisa usada pelo autor consistiu na aplicação de um questionário do tipo Likert com resultados estudados à luz da técnica estatística da Análise de *Clusters* (para a procura de padrões aproximados de resposta). De início, o autor agrupou as questões em quatro *clusters*: 1) imagens mentais e estruturais de entidades; 2) pensamento mecanicista (*mechanistic thinking*); 3) pensamento quântico; 4) pensamento mecanicista conflitante (os *clusters* dois e quatro mostraram confusões dos estudantes). A aplicação posterior ao estudo gerou três *clusters*: 1) pensamento quântico; 2) pensamento quântico conflitante e 3) pensamento mecanicista conflitante (*conflicting mechanistic thinking*). Os *clusters* dois e três mostraram confusões dos estudantes. Os itens mostraram significância estatística ao nível de 1%. O autor afirma não ser possível dizer que os estudantes possuíam um pensamento não-clássico.

Singh (2001) analisou as dificuldades de 89 estudantes que estavam no final de um curso de MQ de um ano de duração. Tal curso versava sobre conceitos relacionados ao problema da medida e à evolução temporal. Singh realizou um teste com todos os estudantes, seguido de entrevistas com nove destes, escolhidos arbitrariamente. A autora afirma que os estudantes tiveram dificuldades semelhantes (a menos de conhecimento prévio, estilo de ensino que tiveram e livros-texto que leram) na compreensão de conceitos tais como os de estados estacionários, auto-estados e dependência temporal dos valores esperados. A pesquisadora conjectura serem tais dificuldades oriundas de uma possível incapacidade de discriminação, por parte dos alunos, de conceitos relacionados e de uma tendência a extrapolar o conteúdo de outros domínios de conhecimento (como a Física Clássica) para o domínio da MQ.

Cataloglu e Robinett (2002) construíram um instrumento de avaliação projetado para testar o entendimento conceitual e usual de MQ, denominado *Quantum Mechanics Visualization Instrument*. O teste foi aplicado a estudantes estadunidenses de níveis de escolaridade denominados *sophomore* e *junior-senior undergraduate* (estudantes de graduação do primeiro

ano e seguinte). Para a construção do teste os autores fizeram uma pesquisa informal sobre os tópicos mais tratados em Física Moderna nos níveis mencionados, sendo os assuntos selecionados: interpretação probabilística da função de onda, propriedades das soluções da equação de Schrödinger (incluindo correlações entre amplitude e oscilação das funções de onda e energia potencial, formas das funções de onda, entre outros), tunelamento quântico e princípio da exclusão de Pauli. Os pesquisadores afirmaram verificar diferenças significativas entre os estudantes dos níveis *sophomore* e *junior-senior undergraduate*.

Montenegro e Pessoa Jr. (2002) narram o resultado de um estudo sobre concepções a respeito do conteúdo de MQ, realizado com oito turmas de uma disciplina de MQ, no período final de seus cursos (com exceção de uma das turmas). O estudo envolveu 121 alunos e a metodologia usada para a pesquisa foi a de análise de questionários e realização de entrevistas, cujos conteúdos versaram sobre o experimento de dupla fenda, o princípio da incerteza, o conceito de estado quântico, o conceito de retrodição e o postulado da projeção. A categorização usada para dividir os dados foi a mesma usada por Pessoa Jr. na obra *Conceitos de Física Quântica* (Pessoa Jr, 2003), a saber, interpretação ondulatória realista, interpretação corpuscular realista, interpretação dualista realista e interpretação dualista positivista. Os autores concluíram que: *o conhecimento que um aluno tem de uma área de Física não é perfeitamente integrado em sua mente. Às vezes, para um mesmo problema, isso o leva a enunciar uma frase e logo em seguida a se contradizer* (Montenegro e Pessoa Júnior, 2002, p. 123); *um aluno pode utilizar representações internas (scripts) distintas, ou interpretações privadas distintas e até contraditórias, para analisar problemas diferentes.* (ibid); *há uma diferença grande entre defender explicitamente ou oficialmente uma interpretação, por um lado, e utilizá-la implicitamente ou privadamente para compreender um problema de Física Quântica, de outro. Ao passo que a maioria dos alunos defendeu “oficialmente” a interpretação ortodoxa, com relação à questão sobre o aparelho de Stern-Gerlach (seção 5) apenas 20% adotaram implicitamente a postura ortodoxa, sendo que 40% se aliaram à visão ondulatória, 30% à interpretação dualista realista e 10% à corpuscular. Esta discrepância revela que a questão das interpretações da teoria não é bem trabalhada nos cursos usuais de Mecânica Quântica* (ibid); *há uma razoável correlação positiva (seção 6), ou seja, em muitos casos o aluno utilizou a mesma interpretação privada em dois problemas diferentes* (op. cit., p. 124).

Taber (2004) fez um estudo exploratório sobre as concepções de estudantes de um *college* britânico (faixa etária de 16 a 18 anos), acerca dos conceitos de orbital eletrônico, spin, hibridização, camadas e níveis de energia, entre outros. Taber realizou entrevistas semi-estruturadas, analisadas a partir da ferramenta das tipologias de impedimento de aprendizagem, uma espécie de heurística que mapeia os obstáculos epistemológicos construídos pelos estudantes. Os resultados mais gerais da pesquisa apontam para o fato de os alunos apresentarem concepções alternativas. A autora destaca as dificuldades dos alunos de: aceitar a

idéia de quantização; formar o conceito de orbital de um elétron; diferenciar os conceitos de camada, subcamada, orbital e níveis de energia; distinguir entre orbitais atômicos e moleculares; entender o conceito de estruturas ressonantes.

Souza et al. (2006) narram os resultados do estudo das concepções de 99 estudantes do Ensino Médio mineiro relativas aos modelos atômicos de Thomson e Bohr, bem como o modo pelo qual compreendiam suas respectivas analogias, a saber, o pudim de passas e o sistema solar. Aplicaram questionários de perguntas abertas cujas respostas foram categorizadas segundo o entendimento dos alunos sobre as analogias. Os autores verificaram a deficiência na compreensão da analogia do pudim de passas, pelos alunos e que os mesmos se posicionam acriticamente em relação ao conteúdo apresentado no contexto escolar, além de ressaltarem que muitos alunos não entendem a própria estrutura interna da analogia. Quanto à analogia do sistema solar, a compreensão dos alunos foi também classificada como deficiente, apesar de a porcentagem dos alunos que conseguiram identificar as relações analógicas entre o átomo e o sistema solar ter sido maior em comparação à do átomo com o pudim de passas.

Singh (2008a) desenvolveu um teste para estimar o conhecimento sobre MQ de 202 estudantes de Física (de sete universidades) do início da graduação. A pesquisadora realizou também uma entrevista com estudantes que haviam concluído um curso versando sobre o mesmo conteúdo do teste. A autora concluiu que, embora alguns estudantes tenham obtido resultados diferentes (alguns alunos de certas universidades obtiveram resultados significativamente maiores que alunos de outras), muitos compartilhavam dificuldades comuns como, por exemplo, as de entendimento do processo de medição e do valor esperado, a de distinção entre os conceitos de estado em geral e auto-estado, além das de entendimento do formalismo da MQ. Para a pesquisadora, tais dificuldades originam-se da generalização do conteúdo aprendido em um contexto para outro em que não se enquadra diretamente.

Çaliskan et al. (2009) construíram um questionário de concepções em Mecânica Quântica, o *quantum concepts questionnaire* (QCQ), aplicado a 71 alunos de Física de uma universidade turca. O QCQ é um questionário do tipo Likert de 26 questões e teve o seu coeficiente alfa de Cronbach, associado à fidedignidade do teste, calculado no valor $\alpha = 0.72$. Como resultado das aplicações, os pesquisadores constataram que os alunos, entre outras concepções: associam a MQ à probabilidade e à estatística; acreditam não ser possível a determinação da trajetória do elétron; discordam que a medição da posição do elétron resulte sempre no mesmo valor; acreditam ser o elétron, segundo o princípio da complementaridade, onda e partícula; acreditam ser o movimento do elétron no átomo, semelhante ao movimento planetário; discordam de que o módulo quadrático da função de onda tenha significância física.

Tsarpalis e Papaphotis (2009) discutem a realização de entrevistas e aplicação de um teste sobre conceitos de Mecânica Quântica para estudantes de faixa etária entre 17 e 18 anos, da 12ª série da escola secundária grega. O estudo quantitativo envolveu 125 estudantes e 23 destes foram selecionados para a realização de entrevistas. As entrevistas foram feitas em grupos (de três ou quatro) e individualmente. Como resultado, os pesquisadores afirmam estar o modelo de Bohr altamente presente na estrutura cognitiva dos estudantes, enquanto o modelo probabilístico era incipiente. Os pesquisadores ressaltaram, também, o fato de muitos estudantes não entenderem o Princípio da Incerteza (e sua atribuição, por parte dos alunos, a falhas experimentais). No estudo foram propostas cinco questões de tipo algoritmo (resolução de problemas usando equações) e o restante, de problemas conceituais (baseados em um trabalho anterior dos autores). Os pesquisadores afirmam ter sido a *performance* do grupo muito melhor nas questões de tipo algoritmo, o que indicaria aprendizagem mecânica, dado o baixo índice na performance de questões de entendimento conceitual. O estudo incluiu, ademais, uma entrevista que corroborou as concepções errôneas apresentadas.

Wuttprom et al. (2009) narram a construção de um questionário de Mecânica Quântica e aplicação deste a uma turma de estudantes de cursos de Física. O questionário passou por um processo de validação por *experts* (validação externa) e também foi aplicado (n=312), tendo o coeficiente de fidedignidade calculado como 0.97 através de dois procedimentos estatísticos distintos. Os autores calcularam, ainda, a média de dificuldade do teste e o seu poder de discriminabilidade, obtendo resultados satisfatórios em relação à literatura. O teste versava sobre efeito fotoelétrico, ondas e partículas, comprimento de onda de De Broglie, experimento de dupla fenda e Princípio da Incerteza. Outra conclusão apresentada pelos autores é a de os estudantes acertarem mais questões factuais e procedimentais que questões conceituais, um indicativo de aprendizagem mecânica, achado similar ao de Tsarpalis e Papaphotis (2009).

Stefani e Tsarpalis (2009) apresentam um estudo de concepções de estudantes sobre temáticas de química/física quântica como orbitais atômicos e moleculares, equação de Schrödinger, hibridização e ligação química. O estudo teve como referencial teórico, a teoria da aprendizagem significativa de Ausubel e envolveu 19 estudantes de nível universitário. As respostas dos estudantes foram classificadas primeiramente em duas categorias, a saber, o nível de explicação e o nível de aprofundamento das concepções epistemológicas das respostas. O nível de explicação incluiu quatro categorias denominadas A (com três alunos), B (com três alunos), C (com cinco alunos) e D (com oito alunos), em ordem de complexidade, sendo as categorias A e B associadas ao pólo da aprendizagem mecânica e as categorias C e D, ao pólo da aprendizagem significativa. O critério para esta divisão foi a existência de inferências causais nas explicações, visto que essas expressam o caráter de não-arbitrariedade de tais explicações. Como conclusões do estudo, os autores afirmam estarem contidas nas respostas, proposições que: variavam da simples reprodução de frases de livros-texto a explicações formuladas pelo próprio

sujeito; revelavam as concepções epistemológicas dos estudantes; indicavam um alto teor de concepções alternativas que geralmente são frutos de interpretações embasadas na AMQ ou são oriundas de raciocínio concreto-pictórico.

Moreira et al. (2009) apresentam um estudo de concepções de estudantes acerca da MQ à luz do referencial das representações sociais. Os pesquisadores comentam os resultados de um teste de associação de conceitos realizado com aproximadamente 2000 respondentes. Nesta etapa, os conceitos (expressões) mais ligados à Mecânica Quântica foram os de: alma, espiritualidade, Física Quântica, incerteza, partícula, pensamento, probabilidade, quantum, sobrenatural e êxito. Os pesquisadores discutem, ademais, a realização de um teste de proximidade entre os conceitos com 530 estudantes (165 alunos de Física, 135 de outros cursos universitários e 230 do Ensino Médio). Em relação aos alunos do primeiro ano de Física, os conceitos mais relacionados à MQ foram os de: partícula, energia, quantum, incerteza e átomo. Em relação aos alunos do último ano de Física, os conceitos mais correlacionados à MQ foram os de: incerteza, probabilidade, Equação de Schrödinger, dualidade onda-partícula e quantização. Para os alunos de primeiro e terceiro anos do Ensino Médio, os conceitos mais próximos à MQ foram os de: êxito, pensamento, incerteza e probabilidade.

Em síntese, os trabalhos da categoria parecem não usar tanto referenciais teóricos de aprendizagem na sua construção, pois somente um terço destes apropria-se desta ferramenta. Ao considerarmos o fato de os trabalhos serem estudos de concepções, este dado se torna justificável, pois neste tipo de pesquisa o objetivo principal é a descrição da forma da estrutura cognitiva ao invés da explicação dos mecanismos subjacentes à aquisição de conhecimento pela mesma. Em alguns trabalhos como, por exemplo, o de Montenegro e Pessoa Jr. (2002), a referência epistemológica cabe no processo de identificação de interpretações privadas em Mecânica Quântica, já o trabalho de Stefani e Tsarpalis (2009), por exemplo, encaixa-se na detecção de padrões de assimilação por parte dos estudantes. Como o objetivo fundamental da maioria é a descrição das concepções e não a explicação de como se formaram, torna-se compreensível o não uso do referencial teórico.

O maior objetivo dos autores ao publicarem trabalhos deste tipo é apresentar um novo questionário para detecção de concepções, narrando o processo de validação (Tsarpalis e Papaphotis, 2009; Wuttprom et al., 2009; Çaliskan, 2009; Cataloglu e Robinett, 2002), bem como a apresentação das possíveis concepções dos estudantes. Outros estudos focam somente na apresentação das concepções usando técnicas de questionários abertos, testes quantitativos e entrevistas, bem como suas combinações (que denominamos técnicas triangulativas).

Uma relativa surpresa diz respeito ao conteúdo das concepções investigadas. O número de trabalhos focando a pesquisa em concepções acerca da AMQ (quatro) é muito próximo do

número de trabalhos enfatizando a pesquisa em concepções acerca da TQM (cinco). Isto é, no entanto, compatível com os dados de Greca e Moreira (2001), pois segundo os autores, esta era uma das categorias acerca da qual menos se conhecia, portanto, pouco se sabia tanto sobre as concepções acerca da AMQ quanto da TQM. Outro achado é o número de dois trabalhos enfocando concepções sobre conceitos associados à categoria que denominamos química quântica que: englobavam conteúdos mais específicos da Química, tais como, hibridização, orbitais, etc.

Opiniões de professores relativas à relevância de conteúdos específicos de Física

Nesta seção, nos faremos de realizar uma síntese do conteúdo dos artigos, visto serem somente três. Discutiremos caso a caso, somente.

Oliveira et al. (2007) narram os resultados de uma pesquisa com dez professores do Ensino Médio fluminense (seis pós-graduados e quatro graduados) sobre a sua opinião quanto à introdução de conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio, em especial do tema Raios-X. Os autores detectaram que a maioria dos professores entrevistados não abordava o conteúdo de Física Moderna em suas aulas (a justificativa mais frequente foi escassez de tempo), embora grande parte deles achasse interessante tanto o uso de História da Ciência nas aulas quanto a introdução do tema mencionado. Os motivos apresentados pelos professores foram vários como, por exemplo: pertinência ao dia-a-dia do aluno, motivação para o estudo da Física e possibilidade de relação desse conteúdo com vários outros das disciplinas do currículo do Ensino Médio. Os professores indicaram também a necessidade de associação do conteúdo a outros recursos pedagógicos.

Nashon et al. (2008) narram os resultados de um estudo de concepções de 16 futuros professores de Física sobre a abordagem CTS e sobre o uso de História e Filosofia da Ciência (HFC). Os pesquisadores aplicaram questionários e implementaram uma observação participante na turma. Na coleta de dados foi perguntado aos futuros docentes quais temas eles consideravam mais problemáticos no ensino da Física, ao que 80% responderam ser a MQ, dada sua abstração. Os sujeitos foram postos a discutir depois da leitura do capítulo de um livro de MQ. Foi, então, aplicado um questionário que tinha como meta obter informações sobre os temas por eles considerados factíveis de ser ensinados sob a perspectiva da HFC, o tipo de História da Ciência por eles preferido para o uso em sala de aula, os tipos de efeitos que julgavam poder ser gerados nos alunos e os desafios antecipáveis nesta abordagem. Os pesquisadores identificaram que: a problemática de entendimento da dualidade onda-partícula por parte dos alunos foi citada como pertinente pelos pesquisados; o mito do cientista herói é prejudicial à construção de uma visão mais adequada da História da Ciência; as biografias são um tipo de literatura que poderia ajudar

no processo de ensino-aprendizagem; os futuros professores acreditam ter a HFC um papel importante, pois pode tornar o conteúdo de Física mais interessante, real e aplicável, além de ser um veículo de construção de uma visão mais adequada, por parte dos alunos, da natureza da Ciência.

Rezende Júnior e Cruz (2009) entrevistaram 31 estudantes de Licenciatura em Física no intuito de obter informações acerca de como estes estudantes vislumbravam a pertinência de introduzir conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio. 15 deles estudavam em universidades catarinenses e 16 em universidades mineiras. Como resultado, os autores *destacaram* que: os professores, em sua maioria, se interessavam em levar a FMC para a escola do Ensino Médio, mas as declarações por eles feitas são preocupantes no que tange à sua formação inicial e podem refletir o uso da cultura dos pré-requisitos; não demonstraram clareza acerca dos conhecimentos prévios necessários para se aprender FMC; tendiam a reproduzir a sequência dos temas estudados durante suas formações quando questionados sobre a possibilidade de implementação de tópicos e temas da FMC no Ensino Médio; consideravam que, por causa da Matemática, o conteúdo de FMC deveria ser tratado somente de forma informativa.

Análise curricular e críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica

Nesta seção estão incluídas as análises curriculares, isto é, o exame dos conteúdos componentes de um dado currículo e sua relevância para os contextos aos quais são destinados. São incorporadas as críticas aos cursos introdutórios no mesmo bojo, pois frequentemente a categorização destas está correlacionada à análise curricular. Sugestões de inovações em conteúdos e estudo da presença de conteúdos em livros-texto são enquadrados nesta categoria, sendo considerados incursões no mesmo terreno.

Araújo e Rodrigues (2001) esboçam uma comparação entre as disciplinas de Física Moderna (FM) e Mecânica Quântica (MQ), afirmando ser a primeira relativa aos cursos de licenciatura e bacharelado em Física e a segunda somente ao currículo do curso de bacharelado em Física. A análise é feita comparando os tópicos abordados pelos livros-texto usados nas duas disciplinas. Os autores concluíram, a partir da análise dos livros didáticos mais usados nos cursos, ter a disciplina FM um viés mais conceitual do que a disciplina MQ, que possui caráter mais matemático e formal. Concluíram também que a disciplina de FM é uma introdução à de MQ, sendo suficiente para prover os licenciandos do conteúdo de Teoria Quântica necessário para os futuros professores do Ensino Médio. A disciplina de MQ seria, entretanto, um aprofundamento necessário somente aos alunos do bacharelado, dada a matematização inerente à disciplina.

Lobato e Greca (2005) investigam a inserção de conteúdos de Teoria Quântica (TQ) nos currículos de Física do Ensino Médio de alguns países europeus, a saber, Portugal, Espanha, França, Inglaterra, País de Gales, Dinamarca, Suécia, Itália e Finlândia, e alguns outros países não-europeus como Canadá e Austrália concluindo que: Portugal, Espanha, Itália e Finlândia têm currículos no enfoque tradicional (que utiliza via histórica), ou seja, inserção da TQ através da hipótese de Planck e do efeito fotoelétrico, seguidos do princípio da incerteza e da dualidade onda-partícula. Alguns destes países dão ênfase à parte experimental (a Finlândia, por exemplo) enquanto outros ressaltam o aspecto filosófico do conteúdo; Dinamarca, Suécia, Canadá e Austrália seguem um padrão semelhante ao da Inglaterra, que adotou a perspectiva de Feynman exibida em seu livro intitulado *Quantum Electrodynamics (QED)*, na tentativa de mudar a proposta tradicional.

Velentzas et al. (2007) fizeram uma busca em 25 livros de Física (15 livros populares – LP – 10 livros-texto – LT) pelo uso de experimentos de pensamento (*gedanken experiment* – EP). O marco referencial desta investigação foi o conjunto de EP encontrados nos trabalhos de Brown (1991), Soresen (1992) e Horowitz & Massey (1991) e a classificação dos EP segundo o trabalho de Brown. Os EP identificados em MQ foram: o do microscópio de Raios Gama de Heisenberg, o do gato de Schrödinger, o paradoxo EPR e o da caixa com luz e relógio (devido a Bohr). Os autores concluíram que: tanto os LT quanto os LP usam os EP como ferramentas didáticas para apresentar conceitos físicos; no Ensino de MQ, 80% dos livros-texto focam no Princípio da Incerteza de Heisenberg; o microscópio de Raios Gama de Heisenberg é usado em 70% dos livros-texto; os LP usam mais os EP para contar histórias, ou seja, como recurso motivacional.

Niaz e Fernández (2008) analisaram 55 livros de Química enfocando a MQ, através da construção de cinco critérios para avaliação da elaboração do texto, a saber, se os materiais levavam em conta: as origens da teoria quântica; as diferentes interpretações da teoria; a diferenciação entre orbital e densidade eletrônica; a diferenciação e comparação entre Mecânica Clássica e Mecânica Quântica; a introdução de números quânticos com base na densidade eletrônica. Como conclusão os autores destacaram que nenhum dos livros analisados: trata a hipótese de Planck como ajuste empírico. Em outras palavras que não foi Planck quem deu a significância física para a hipótese quântica, senão que foi Einstein; aborda as distintas interpretações da Mecânica Quântica; propõe uma forma de facilitar a transição do limite quântico para o clássico.

Dos quatro trabalhos apresentados, vemos que três deles atacam problemas relativos ao Ensino Médio. Um deles (Lobato e Greca, 2005) estuda os currículos europeus e de alguns países desenvolvidos, enquanto os outros dois (Niaz e Fernández, 2008; Velentzas et al., 2007) preocupam-se com a estrutura de livros didáticos (e de divulgação, em um dos trabalhos, a saber, Velentzas et al., 2007) de Física (Química) do nível médio. O trabalho restante apresenta a diferença, quase óbvia, entre os cursos de Física Moderna (*Estrutura da Matéria em algumas*

universidades) e Mecânica Quântica. São poucos os trabalhos de análise curricular, talvez devido a caracterizarem-se, em grande parte, pelo fôlego e domínio de conteúdo exigidos para tal.

Análise teórica/epistemológica

Nesta categoria estão incluídas as discussões teóricas ou epistemológicas de apresentação de conteúdo sob o ponto de vista de uma teoria de aprendizagem ou epistemologia, bem como as discussões epistemológicas sobre o conteúdo de MQ com implicações educacionais.

Treagust (2000) faz uma análise epistemológica, diferenciando os conceitos de descrição e explicação, afirmando que muitos alunos confundem os termos. O autor estuda, também, as explicações que devem ser dadas por professores e as que devem ser dadas por cientistas, atribuindo papel importante ao contexto e ao conhecimento prévio do estudante no caso das explicações educacionais. A partir disto e da leitura do texto de Richard Feynman "*Atoms in motion*", o pesquisador justifica o uso do mesmo como um referencial explicativo (*explanatory framework*) para o uso em sala de aula, pois sua simplicidade facilitaria a transposição didática do conteúdo de Física Moderna. Para o autor as explicações efetivas, em situações educacionais, dependem de diversos fatores como: conteúdo de ciência, conteúdo educacional, aspectos individuais inerentes aos estudantes e aspectos inerentes ao professor de Ciências.

Hadzidaki et al. (2000; Karakostas e Hadzidaki, 2005) analisam epistemologicamente o processo de ensino-aprendizagem de MQ, embasados na epistemologia de Kuhn. Fundamentam, pois, uma abordagem de ensino embasada na ideia de níveis de realidade, que leva em conta aspectos do referencial epistemológico kuhniano e premissas da psicologia cognitiva. O modelo epistemológico voltado ao ensino é parecido ao de mudança conceitual, porém leva em seu bojo aspectos peculiares que o distinguem do de mudança conceitual, como, por exemplo, a reconstrução fraca, o oposto do que os autores chamam de reconstrução radical (mais parecida com a ideia original de mudança conceitual). Segundo os autores, esse modelo seria potencialmente frutífero na transição de um nível de realidade (Mecânica Newtoniana, por exemplo) para outro (Mecânica Quântica, por exemplo).

Brockington e Pietrocola (2005) descrevem a teoria da transposição didática de Yves Chevallard e exploram as possibilidades de aplicação das regras desta para os conceitos de MQ ao nível do Ensino Médio, bem como as limitações e condições necessárias para tal. Criticam, com base na teoria, as posturas de alguns materiais didáticos como, por exemplo, a idealização meramente arbitrária que ocorre em livros didáticos (ocultação da razão de apresentação de um modelo idealizado) e a descontextualização histórico-social do conteúdo (o cálculo da distância de frenagem como não relevante para o desenvolvimento científico). Para os autores, estas posturas

resultam em uma trivialização da simplificação do conteúdo científico para adequá-lo à sala de aula. Os autores discutem a possibilidade da ênfase na argumentação filosófica como meio de privilegiar o debate e as características mais qualitativas deste conhecimento.

Hadzidaki (2008b), seguindo a linha de outro trabalho publicado (Hadzidaki, 2008a) faz uma discussão epistemológica da MQ em torno do princípio da separabilidade dos sistemas físicos, válido na MC e inválido na MQ, como sendo uma das principais diferenças entre os dois paradigmas. A discussão abarca também o Princípio da Complementaridade de Niels Bohr, que tem sua potencialidade didática valorizada. Os trabalhos de Hadzidaki nesta linha fundamentam uma proposta didática que foca na mudança conceitual como uma mudança paradigmática. A autora constrói uma intervenção didática que incorpora: o conteúdo de MQ aos comprometimentos epistemológicos e ontológicos fundamentais às teorias de explicação; as razões das falhas das explicações clássicas no domínio quântico; uma estratégia explanatória inspirada nas vias epistemológicas através das quais, no nascimento da MQ, a ciência alcançou gradualmente seu entendimento. Para a autora, essa proposta que carrega elementos meta-cognitivos e meta-científicos, foca não somente o alcance da aprendizagem em MQ, mas também de uma visão mais adequada da natureza da Ciência.

Esta categoria, não existente no trabalho de Greca e Moreira (2001) e ajustada a partir de uma semelhante, presente no de Ostermann e Moreira (2000), ilustra a presença de trabalhos fundamentais para a apresentação de novas propostas de linhas de pensamento em Ensino de Física. Três deles, potencialmente voltados para o conteúdo de Física como um todo (Hadzidaki et al., 2000; Brockington e Pietrocola, 2005; Hadzidaki, 2008a), são usados para justificar a proposta de um dado viés para a construção de unidades didáticas em Mecânica Quântica (Física Moderna, Estrutura da Matéria). O trabalho restante preocupa-se em fundamentar epistemologicamente um texto didático passível de ser usado no Ensino Médio. Tal categoria é de grande valia na reflexão da organização do conteúdo tanto no que tange ao uso de teorias de aprendizagem quanto de epistemologia.

Considerações finais

O maior número de publicações analisado se encontra na categoria de implementação de propostas didáticas (27 trabalhos) e o menor nas categorias de análise teórica/epistemológica e análise curricular (quatro trabalhos em cada uma). Percebemos, além disto, que os artigos nas áreas de concepções de alunos e professores têm se tornado, quantitativamente, mais relevantes. Alguns dos trabalhos, entretanto, são muito introdutórios, pois focam na construção de questionários para a detecção de concepções e por vezes descrevem mais a capacidade do instrumento que as concepções obtidas.

Outro ponto a ser destacado é o progresso da pesquisa nesta temática. O número de artigos por ano vem apresentando avanços e retrocessos, porém, em termos gerais o número tem aumentado (ver tabela 1 e figura 1). Os anos com menor número de publicações foram os de 1999 (1 artigo), 2003 (2 artigos), 2004 (2 artigos) e 2006 (1 artigo) e os anos com maior número de publicações foram os de 2008 (12 artigos) e 2009 (15 artigos). Deve-se destacar que os artigos consultados são os que versam sobre a pesquisa em Ensino de Física em si.

Tabela 1: Número de publicações consultadas por ano

Ano	Número de publicações
1999	1
2000	4
2001	7
2002	7
2003	2
2004	2
2005	5
2006	1
2007	4
2008	12
2009	15

Na categoria de propostas didáticas o número de publicações foi aproximadamente uniformemente distribuído ao longo do tempo. Já na categoria de implementações de propostas didáticas, ocorreu um salto no número de publicações nos anos de 2008 (5 artigos) e 2009 (8 artigos). No que tange à classificação dos estudos de concepções, o salto também ocorreu em 2009 (6 artigos). Nas duas classificações restantes a distribuição foi quase uniforme. (Ver tabela 2)

Tabela 2: Número de artigos publicados por ano em cada categoria

Ano	PD	IPD	EC	AC	AT/AE
1999	0	1	0	0	0
2000	4	0	1	0	0
2001	1	4	1	1	0
2002	3	2	2	0	0
2003	2	0	0	0	0
2004	0	1	1	0	0
2005	1	2	0	1	1
2006	0	0	1	0	0
2007	1	1	1	1	0
2008	3	5	2	1	1
2009	1	8	6	0	0

Deve-se destacar ainda a quantidade de estudos de concepções que vem progredindo ao longo do tempo, fato crucial para o avanço da área de pesquisa em Ensino de MQ, visto que nos permite tanto verificar o conhecimento prévio dos estudantes como suas concepções alternativas (ou errôneas), um fator fundamental para a determinação de pontos de partida para o desenvolvimento de estratégias didáticas facilitadoras da aprendizagem. Greca e Moreira (2001, p.30) e Ostermann e Moreira (2000, p.32) afirmam ser baixo o número de publicações, fato com que estamos de acordo, pois 15 artigos em dez anos é um número pouco expressivo, porém, felizmente, o número de artigos voltados a esta problemática tem crescido de forma considerável na literatura.

Referências

- Abd-El-Khalick, F. (2002). Rutherford's enlarged: a content-embedded activity to teach about nature of Science. **Physics Education**, 37(1), 64-68.
- Araújo, W. S., & Rodrigues, C. (2001). Comparação entre as ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 23(3), 360-365.

- Arlego, M. (2008). Los fundamentos de la mecánica cuántica en la escuela secundaria utilizando el concepto de integral de camino. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, 5 (1), 59-66.
- Asikainen, M. A. & Hirvonen, P. E. (2009). A study of pre-service and inservice physics teachers' understanding of photoelectric phenomenon as part of the development of a research-based quantum physics course. **American Journal of Physics**, 77(7), 658-666.
- Bao, L. & Redish, E. (2002). Understanding probabilistic interpretations of physical systems: a prerequisite to learning quantum physics. **American Journal of Physics**, 70(3), 210-217.
- Barros, M. A. & Bastos, H. F. (2007). Investigando o uso do Ciclo da Experiência Kellyana na compreensão do conceito de difração de elétrons. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 24(1), 26-49.
- Brockington, G. & Pietrocola, M. (2005). Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna? **Investigações em Ensino de Ciências**, 10(3), 387-404.
- Budde, M., Nidderer, H., Scott, P. & Leach, J. (2002a). "electronium" a quantum atomic teaching model. **Physics Education**, 37 (3), 197-203.
- Budde, M., Nidderer, H., Scott, P. & Leach, J. (2002b). The quantum atomic model 'Electronium': a successful teaching tool. **Physics Education**, 37(3), 204-210.
- Çaliskan, S., Sezgin, G. S. & Erol, M. (2009). Students understanding of some quantum physical concepts. **Latin American Journal of Physics Education**, 3(2), 202-206.
- Carr, L. D. & McKagan, S. B. (2009). Graduate quantum mechanics reform. **American Journal of Physics**, 77(4), 308-319.
- Carvalho Neto, R., Freire Jr, O. & Silva, J. (2009). Improving student's meaningful learning on the predicative nature of quantum mechanics. **Investigações em Ensino de Ciências**, 14(1), 65-81.
- Cataloglu, E. & Robinett, R. W. (2002). Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. **American Journal of Physics**, 70(3), 238-251.
- Cavalcante, M. & Tavoraro, C. (2001). Uma oficina de Física Moderna que vise sua inserção no Ensino Médio. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 18(3), 289-316.
- Fanaro, M. A., Arlego, M. & Otero, M. R. (2007). El método de caminos múltiples de Feynman como referencia para introducir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela secundaria. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 24(2), 233-260.

- Fanaro, M. A., Arlego, M. & Otero, M. R. (2009). Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. **Investigações em Ensino de Ciências**, 14(1), 37-64.
- Fanaro, M. A. & Otero, M. R. (2008). Basic quantum mechanics teaching in secondary school: one conceptual structure based on paths integrals methods. **Latin American Journal of Physics Education**, 2(2), 103-112.
- Fanaro, M. A. & Otero, M. R. (2009). Teoremas en acto y situaciones de Mecánica Cuántica en la Escuela Media. **Latin American Journal of Physics Education**, 3(2), 307-323.
- Goff, A. (2006). Quantum tic-tac-toe: a teaching metaphor for superposition in quantum mechanics. **American Journal of Physics**, 74(11), 962-973.
- Greca, I. & Freire Jr., O. (2003). Does an emphasis on the concept of quantum states enhance student's understanding of Quantum Mechanics? **Science and Education**, 12(5-6), 541-557.
- Greca, I. M. & Herscovitz, V. E. (2002). Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. **Enseñanza de las Ciencias**, 20(2), 327-338.
- Greca, I.M. & Herscovitz, V. E. (2005). Superposição linear em Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, 5(1), 61-77.
- Greca, I. M. & Moreira, M.A. (2001). Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências**, 6(1). P.29-56.
- Greca, I. M., Moreira, M. A. & Herscovitz, V. E. (2001). Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 23(4), 444-457.
- Hadzidaki, P. (2008a). The Heisenberg microscope: a powerful instructional tool for promoting meta-cognitive and meta scientific thinking on quantum mechanics and the nature of science. **Science and Education**, 17(6), 613-639.
- Hadzidaki, P. (2008b). 'Quantum Mechanics' and 'Scientific Explanation' an explanatory strategy aiming at providing 'understanding'. **Science and Education**, 17(1), 49-73.
- Hadzidaki, P., Kalkanis, G. & Stavrou, D. (2000). Quantum Mechanics: a systemic component of the modern physics paradigm. **Physics Education**, 35(6), 386-392.
- Ireson, G. (2000). The quantum understanding of pre-university physics students. **Physics Education**, 35(1), 15-21.
- Johansson, K. E. & Milstead, D. (2008). Uncertainty in the classroom – teaching Quantum Physics. **Physics Education**, 43(2), 173-179.

- Kalkanis, G., Hadzidaki, P. & Stavrou, D. (2003). An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concepts. **Science Education**, 87(2), 257-280.
- Karakostas, V. e Hadzidaki, P. (2005). Realism vs. Constructivism in contemporary physics: the impact of the debate on understanding of Quantum theory and its instructional processes. **Science and education**. 14(), p.607-629
- Krey, I. & Moreira, M. A. (2009). Abordando tópicos de Física Nuclear e Radiação em uma disciplina de Estrutura da Matéria do currículo de Licenciatura em Ciências através de situações problema. **Latin American Journal of Physics Education**, 3(3), 595-605.
- Krey, I. & Moreira, M. A. (2009). : Implementación y evaluación de una propuesta de enseñanza para el tópico física de partículas en una disciplina de estructura de La materia basada en la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, 8(3), 812-833.
- Lobato, T. & Greca, I.M. (2005). Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de Física do Ensino Médio. **Ciência e Educação**, 11(1), 119-132.
- McKagan, S. B., Perkins, K. K., Dubson, M., Malley, C., Reid, S. LeMaster, R. & Wieman, C. E. (2008). Developing and researching PhET simulations for teaching Quantum Mechanics. **American Journal of Physics**, 76(4-5).
- Michelini, M.; Ragazzon, R.; Santi, L.; Stefanel, A. (2000). Proposal for quantum physics in secondary school. **Physics Education**, 35, (6), 406-410.
- Montenegro, R. & Pessoa Jr, O. (2002). Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de Física. **Investigações em Ensino de Ciências**, 7(2), 107-126.
- Moreira, M. A., Hilger, T. & Präss, A. R. (2009). Representaciones sociales de la física y de la mecánica cuántica. **Revista de Enseñanza de la Física**, 22(1), 15-30.
- Müller, R. & Wiesner, H. (2002). Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**, 70(3), 200-209.
- Nashon, S., Nielsen, W. & Petrina, S. (2008). Whatever happened to STS? Pre-service teachers and the history of quantum mechanics. **Science and Education**, 17(4), 387-401.
- Niaz, M. & Fernández, R. (2008). Understanding quantum numbers in general chemistry textbooks. **International Journal of Science Education**, 30(7), 869-901.
- Oliveira, F. F., Vianna, D. M. & Gerbassi, R. S. (2007). Física Moderna no Ensino Médio: o que dizem os professores? **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 29(3), 447-454.

- Ostermann, F. & Moreira, M.A. (2001). Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, 14(1), 23-48.
- Ostermann, F. & Ricci, T. (2004). Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. **Ciência e Educação**, 10(2), 235-257.
- Ostermann, F. & Ricci, T. (2005). Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 22(1), 9-35.
- Ostermann, F., Prado, S. D. & Ricci, T. (2008). Investigando a aprendizagem de professores de Física acerca do fenômeno da interferência quântica. **Ciência e Educação**, 14(1), 35-54.
- Pantoja, G.C. (2011). **Sobre o ensino de conceito de evolução temporal em Mecânica Quântica**. 255f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Peduzzi, L. O. Q. & Basso, A. (2005). Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 27(4), 545-557.
- Pereira, A., Ostermann, F. & Cavalcanti, C. (2009a). O ensino de Física Quântica na perspectiva sociocultural: uma análise de um debate entre futuros professores mediado por um interferômetro virtual de Mach-Zender. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, 8(2), 376-398.
- Pereira, A., Ostermann, F. & Cavalcanti, C. (2009b). On the use of a virtual Mach-Zender interferometer in the teaching of quantum physics. **Physics Education**, 44(3), 281-291.
- Pinto, A.C. & Zanetic, J. (1999). É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 16(1), 7-34.
- Rezende Jr, M. F. & Cruz, F. F. S. (2009). Física Moderna e Contemporânea na formação de licenciandos em Física: necessidades conflitos e perspectivas. **Ciência e Educação**, 15(2), 305-321.
- Sales, G. L., Vasconcelos, F. H. L., Castro Filho, J. A. & Pequeno, M. C. (2008). Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de Física Moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 30(3), 3051.
- Stefani, C. & Tsarpalis, G. (2009). Student’s levels of explanations, models and misconceptions in Basic Quantum Chemistry: A phenomenographic study. **Journal of Research in Science Teaching**, 46(5), 520-536.
- Singh, C. (2001). Student understanding of quantum mechanics. **American Journal of Physics**, 69(8), 885-895.
- Singh, C. (2008a). Interactive learning on quantum mechanics. **American Journal of Physics**, 75(4-5), 400-405.

- Singh, C. (2008b). Student understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. **American Journal of Physics**, 76(3), 277-287.
- Souza, V., Justi, R. & Ferreira, P. (2006). Analogias utilizadas no ensino dos modelos atômicos de Thomson e Bohr: uma análise crítica do que os alunos pensam a partir delas. **Investigações em Ensino de Ciências**, 11(1), 7-28.
- Taber, K. (2004). Learning Quanta: Barriers to stimulating transitions in student understanding of Orbital ideas. **Science Education**, 89(1), 94-116.
- Treagust, D. (2000). In search of explanatory frameworks: an analysis of Richard Feynman's lecture 'Atoms in motion'. **International Journal of Science Education**, 22(11), 1157-1170.
- Tsarpalis, G. & Papaphotis, G. (2009). High-school students' conceptual difficulties and attempts at a conceptual change. **International Journal of Science Education**, 31(7), 895-930.
- Velentzas, A., Halkia, K. & Skordoulis, C. (2007). Thought experiments in the theory of relativity and in quantum mechanics: their presence in textbooks and in popular science books. **Science and Education**, 16(3-5), 353-370.
- Wuttprom, S., Sharma, M. D., Johnston, I. D., Chitaree, R. & Soankwan, C. (2009). Development and use of a conceptual survey in introductory quantum physics. **International Journal of Science Education**. 31(5), 631-654.
- Zollman, D. A., Rebello, N. S. & Hogg, K. (2002). Quantum mechanics for everyone: hands-on activities integrated with technology. **American Journal of Physics**, 70(3), 252-259.

Glauco Cohen Ferreira Pantoja. Mestre em Ensino de Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Doutorando em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). glaucopantoja@hotmail.com

Marco Antonio Moreira. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Professor do Departamento de Física e do Programa de Pós-graduação em Ensino de Física. Doutor em Ciências pela Cornell University/USA. moreira@if.ufrgs.br

Victoria Elnecave Herscovitz. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Física. Professora do Departamento de Física e do Programa de Pós-graduação em Ensino de Física. Doutora em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. victoria@if.ufrgs.br