
FÍSICA QUÂNTICA NO ENSINO MÉDIO: O QUE DIZEM AS PESQUISAS⁺*

André Coelho da Silva¹

Maria José Pereira Monteiro de Almeida

Universidade Faculdade de Educação – Unicamp

Grupo de Estudo e Pesquisa em Ciência e Ensino – gepCE²

Campinas – SP

Resumo

Com o intuito de verificar quais as contribuições da pesquisa em Ensino de Ciências e qual a natureza destas contribuições para que a Física Quântica possa ser trabalhada no Ensino Médio, revisamos artigos científicos que tratam do ensino da Física Quântica nesse nível de ensino. Ao todo, vinte e três trabalhos foram encontrados em periódicos nacionais e internacionais. Montamos cinco categorias a fim de separar os artigos de acordo com seus objetivos. Apesar de terem sido verificadas contribuições de diversas naturezas, apontamos para a necessidade da realização de mais trabalhos a fim de, sobretudo, apoiar o professor de Física do Ensino Médio. Afinal, ele é quem pode, de fato, mediar a inserção da Física Quântica na escola.

⁺ Quantum Physics in High School: what the investigations say

^{*} *Recebido: maio de 2011.
Aceito: setembro de 2011.*

¹ Licenciando em Física

² Apoio: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq

Palavras-chave: *Física Quântica. Ensino Médio. Revisão Bibliográfica.*

Abstract

In order to examine the contributions of research in Science Education and the nature of these contributions to enable the insertion of Quantum Physics in High School, we review scientific papers about the teaching of Quantum Physics at this level of education. Altogether twenty three papers were found in national and international journals. We created five categories to separate the papers according to their goals. Although it has been checked several kinds of contributions, we point to the need for further research in order to mainly support the Physics teacher in High School. After all, he is who can actually mediate the insertion of the Quantum Physics in school.

Keywords: *Quantum Physics. High School. Literature Review.*

I. Introdução

Muitos pesquisadores em Ensino de Física têm dedicado seus trabalhos a defender a tese de que se faz necessário enfrentar o desafio de inserir temas de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Médio (EM). Machado e Nardi (2007, p. 91) defendem a atualização curricular “(...) tendo em vista a formação de cidadãos capazes de compreender as bases de inúmeras tecnologias presentes no dia a dia, tais como os computadores, o *laser* e os sistemas de posicionamento global por satélite (GPS), dentre inúmeros outros.”. Seguindo a mesma linha de raciocínio, Oliveira et al (2007, p.447) dizem que o ensino de Física no nível médio “(...) não tem acompanhado os avanços tecnológicos ocorridos nas duas últimas décadas e tem se mostrado cada vez mais distante da realidade dos alunos.”. Moreira (2007, p.172) critica a falta de contemporaneidade dos conhecimentos ensinados: “(...) não tem sentido que, em pleno século XXI, a Física que se ensina nas escolas se restrinja à Física (Clássica) que vai apenas até o século XIX.”.

Ostermann e Moreira (2000), em um artigo de revisão bibliográfica, apontam diversas justificativas para que se ensine FMC no EM. Destacamos, aqui, algumas delas: reconhecer a Física como empreendimento humano; despertar a curiosidade e entusiasmar os estudantes; apresentar aos estudantes o excitante

mundo atual da pesquisa em Física; atrair jovens para a carreira científica; fato constatado em pesquisas de que a Física Clássica também é alvo de sérias dificuldades conceituais por parte dos estudantes; contribuir para dar uma imagem mais correta da Ciência e da natureza do trabalho científico.

Por estar diretamente relacionada às tecnologias modernas e pelo fato de documentos oficiais da educação brasileira (Lei de Diretrizes e Bases, Parâmetros Curriculares Nacionais, entre outros) defenderem um ensino mais contextualizado, mais ligado à cultura humana, é inegável a importância de se ensinar FMC no Ensino Médio, incluindo a Física Quântica.

Em uma revisão bibliográfica mais específica de Mecânica Quântica (MQ) introdutória, Greca e Moreira (2001) afirmam que os efeitos da MQ sobre a tecnologia moderna e a variedade de fenômenos por ela explicados torna recomendável seu estudo em diversas áreas e cada vez mais cedo. Já Cavalcante e Tavolaro (2001), ressaltam a importância da MQ na mudança de concepção de mundo e de postura diante da vida do homem moderno, afinal, ela implica o fim do determinismo.

Em suma, pode-se dizer que, entre os pesquisadores que se dedicam a pensar essa questão, há bastante consenso sobre a necessidade de inserção de temas de FMC no EM.

Partindo dessa constatação, consideramos a relevância de se focalizar uma das principais temáticas da FMC, a Física Quântica (FQ). Assim, neste estudo, nosso intuito foi verificar quais as contribuições da pesquisa em Ensino de Ciências e qual a natureza destas contribuições para que a FQ possa ser trabalhada no EM.

II. Levantamento e classificação dos artigos

Foi realizada uma busca por artigos científicos e artigos destinados a professores com foco em questões relacionadas ao ensino de FQ no EM. Para tanto, foram consultados alguns dos principais periódicos da área de Educação em Ciências no geral e em particular da Educação em Física, todos eles em versão eletrônica.

Revisamos os periódicos publicados desde seu primeiro número até agosto de 2010. Vale ressaltar que alguns dos periódicos estrangeiros não permitem o acesso a todo seu conteúdo. Assim, foram levantados apenas artigos que possuem acesso livre a partir da rede de computadores de uma das universidades públicas estaduais de São Paulo.

O procedimento de busca por artigos científicos nos periódicos eletrônicos seguiu alguns passos: procuramos nos títulos, resumos ou palavras-chave das publicações a palavra “quântica” (ou “cuántica” ou “quantum”). Nos artigos que passaram por este filtro, buscamos a palavra “Ensino Médio” ou “Secundário” (“Secundario” ou “Secundaria” ou “High School” ou “Secondary”) nestas mesmas seções. Se o artigo não tinha resumo (como os artigos da revista “A física na escola”, por exemplo), fazíamos essa segunda busca no texto completo aliada a uma análise da coerência entre o artigo e o nosso objetivo.

A grande maioria dos trabalhos selecionados passou pelo critério acima mencionado, porém, consideramos que poderíamos, também, incluir em nossa amostra artigos de revisões bibliográficas gerais sobre o ensino de FMC, pois, entre os tópicos de FMC, está a FQ. Para encontrar estes artigos, buscamos, nos títulos das publicações, as palavras “revisão” e “moderna”.

Dessa forma, alcançamos o número total de vinte e três artigos que falam sobre o ensino de FQ no EM.

Na tabela 1, constam os periódicos dos quais foi selecionado ao menos um artigo. É possível verificar, também, o número de trabalhos selecionados de cada periódico, bem como o ano de publicação de cada um dos artigos.

Foram consultados, também, outros periódicos da área, tais como: *Ciência & Ensino*; *Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências*; e *Experiências em Ensino de Ciências*; porém, nestes não foi encontrado nenhum artigo seguindo os critérios de busca anteriormente explicitados.

Além de verificar a possibilidade de contribuição desses artigos, no que diz respeito a sustentar a abordagem da FQ no EM, buscamos, também, classificá-los de acordo com seus objetivos. Para isso, criamos cinco categorias:

1) **Revisão da literatura sobre o ensino de FQ/FMC:** publicações que reúnem e comentam trabalhos anteriormente desenvolvidos sobre os temas: “ensino de Física Quântica” ou “ensino de Física Moderna e Contemporânea”.

2) **Análise curricular:** publicações que analisam currículos no que se refere a tópicos de Física Quântica.

3) **Análise dos conteúdos em livros que abordam FQ/FMC:** publicações que analisam o conteúdo de Física Quântica ou Física Moderna e Contemporânea presente em livros (didáticos, de divulgação científica, ou de qualquer outro gênero).

4) **Elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino:** publicações que apresentam propostas de como ensinar Física Quântica e/ou avaliam resultados alcançados após a aplicação de propostas desenvolvidas com o intuito de se ensinar Física Quântica.

5) **Concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EM:** publicações que analisam posições de professores sobre o ensino de Física Quântica ou Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.

Tabela 1: Periódicos dos quais foi selecionado ao menos um artigo científico; número de artigos selecionados por periódico e ano de publicação.

PERIÓDICO	NÚMERO DE ARTIGOS SELECIONADOS	ANO DE PUBLICAÇÃO DOS ARTIGOS SELECIONADOS
A física na escola	1	2007
Caderno Brasileiro/Catariense de Ensino de Física	3	1999, 2007, 2007
Ciência & Educação	2	2005, 2009
International Journal of Science Education	1	2002
Investigações em Ensino de Ciências	6	2000, 2001, 2005, 2009, 2009, 2009
Physics Education	3	1997, 1999, 2008
Revista Brasileira de Ensino de Física	1	2008
Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências	2	2004, 2009
Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias	1	2009
Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias	2	2008, 2009
Science & Education	1	2007
TOTAL	23	De 1997 até 2009

Vale ressaltar que as categorias foram elaboradas de tal maneira que cada publicação acabou sendo alocada em apenas uma categoria. Como consequência disso, boa parte dos artigos foram alocados na categoria “Elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino”.

A tabela 2 mostra em que categoria cada artigo científico foi alocado.

Tabela 2: Classificação dos artigos analisados de acordo com seus objetivos.

REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O ENSINO DE FQ/FMC: 3	Ostermann e Moreira (2000) Greca e Moreira (2001) Pereira e Ostermann (2009)
ANÁLISE CURRICULAR: 2	Lobato e Greca (2005) Brockington e Pietrocola (2005)
ANÁLISE DOS CONTEÚDOS EM LIVROS QUE ABORDAM FQ/FMC: 1	Velentzas et al (2007)
ELABORAÇÃO E/OU APLICAÇÃO DE PROPOSTAS DE ENSINO: 16	Cuppari et al (1997) Pospiech (1999) Pinto e Zanetic (1999) Olsen (2002) Paulo e Moreira (2004) Costa et al (2007) Andrade et al (2007) Fanaro et al (2007) Johansson e Milstead (2008) Sales et al (2008) Arlego (2008) Otero et al (2009) Carvalho Neto et al (2009) Fanaro et al (2009a) Fanaro et al (2009b) Ostermann et al (2009)
CONCEPÇÕES DE PROFESSORES SOBRE O ENSINO DE FQ/FMC NO EM: 1	Monteiro et al (2009)

Passamos, agora, a descrever sinteticamente os artigos alocados em cada uma das categorias.

III. Síntese do que dizem os artigos

III.1 Revisão da literatura sobre o ensino de FQ/FMC

Ostermann e Moreira (2000) fizeram uma revisão da literatura sobre a FMC no EM a partir de buscas na *internet*, consultas a artigos de periódicos, livros didáticos, dissertações, teses e projetos. Os trabalhos encontrados foram classificados em seis grupos e os autores concluíram que havia necessidade de amadurecer a linha de pesquisa “FMC no Ensino Médio”, pois, em contraposição às inúmeras justificativas para a atualização curricular, haveria ainda poucos testes “práticos” com turmas de EM.

Greca e Moreira (2001) fizeram uma revisão da literatura referente ao ensino de conteúdos introdutórios de MQ a partir de 1970. Os artigos encontrados nos periódicos consultados foram classificados em três diferentes grupos e, com base nesta classificação, os autores puderam constatar que as publicações relativas ao ensino de FQ no EM, entre outras coisas, levam à conclusão de que os estudantes possuem uma imagem concreta do átomo; tendem a usar os conceitos de movimento, trajetória, conservação e massa ao explicar propriedades dos átomos; tendem a pensar o conceito de probabilidade como algo que não se conhece exatamente; têm uma visão muito simplista da FMC, ignorando as crises no desenvolvimento da Física Clássica e, conseqüentemente, tendo dificuldades na compreensão de temas fundamentais como a dualidade onda-partícula.

Pereira e Ostermann (2009) também realizaram uma revisão bibliográfica envolvendo a consulta de artigos sobre o ensino de FMC (mas agora em qualquer nível de ensino) em revistas da área de Ensino de Ciências do Brasil e do exterior publicados entre 2001 e 2006. Foram buscados trabalhos direcionados ao ensino de Física. Ao todo 102 trabalhos foram selecionados.

Além de sintetizar brevemente o conteúdo de algumas dessas publicações, os autores as classificaram em quatro categorias: “bibliografia de consulta para professores” (51%); “propostas didáticas testadas em sala de aula”; “levantamento de concepções”; e “análise curricular”, sendo o restante (49%) distribuído nessas outras três categorias.

Quanto às tendências de pesquisa no período avaliado, os autores ressaltaram que, apesar do aumento relativo de publicações que apresentam resultados de pesquisa, a maioria dos artigos sobre o ensino de FMC ainda se refere à bibliografia de consulta para professores, sendo necessário, então, avaliar criticamente estes materiais, a fim de testar sua eficiência prática. Quanto aos trabalhos que avaliaram propostas didáticas em sala de aula, os autores defendem que, além da preocupação

com o conteúdo e o rigor científico com que eles são apresentados, haja uma investigação acerca dos processos conduzidos em sala, os quais condicionariam e estruturariam a aprendizagem. Assim, uma melhor compreensão dos mecanismos utilizados por professores e alunos no processo de construção de conhecimentos de temas de FMC poderia ser alcançada.

III.2 Análise curricular

No que se refere à análise curricular, Lobato e Greca (2005) realizaram um estudo acerca dos currículos escolares de Física de diversos países: Portugal, Espanha, França, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Canadá, Austrália, Itália e Finlândia, focando, principalmente, no que concerne à teoria quântica. As informações referentes aos currículos dos diversos países foram obtidas pela *internet* (em sites oficiais) e também através de um questionário enviado a pessoas que conheciam os currículos destes países. Segundo as autoras, todos os currículos de nível secundário analisados contêm os seguintes assuntos: dualidade, níveis de energia, experiência da dupla fenda, efeito fotoelétrico, princípio de incerteza e aplicações da teoria quântica, isto é, valorizar-se-ia a ligação entre os conhecimentos e a tecnologia, o cotidiano e as necessidades sociais e ambientais. Concluindo, elas afirmam que a avaliação da adequação dos conteúdos escolhidos e da melhor forma de ensiná-los ainda requer muita pesquisa, afinal, seria muito difícil entender o que não se pode ver. Além disso, apontam a necessidade de uma melhor formação do professor sobre esses conteúdos.

Brockington e Pietrocola (2005) analisaram, baseados na teoria da “Transposição Didática”, os motivos que fariam conhecimentos mais modernos – como a FQ – praticamente não serem abordados em aulas de Física.

Segundo os autores, Yves Chevallard define a Transposição Didática como um instrumento que possibilitaria analisar o processo de transposição de saberes para diferentes contextos, aparato teórico que segundo eles exibiria os motivos pelos quais a cinemática (e, também, a termodinâmica e a eletricidade) reinaria no Ensino Médio: ela seria resultado de um longo e bem-sucedido processo de criatividade e transposição didática, seria consensual e, principalmente, possuiria alta operacionalidade – que seria a regra de maior importância no processo de transposição por criar uma associação estreita com a avaliação, pois, diante de uma resposta numérica, não haveria discussão: ou ela está certa, ou está errada, eliminando-se, assim, dúvidas de julgamento (seria uma avaliação “neutra”) e diminuindo-se a carga de tarefas do professor, por facilitar a correção de provas e testes.

Logo, a ausência da teoria quântica no Ensino Médio se justificaria, principalmente, pelo fato de ela possuir baixa operacionalidade, embora seja (em sua maior parte) consensual. Esta baixa operacionalidade poderia ser apenas momentânea, visto que as experiências de ensino ainda são recentes e não suficientes para estimular de forma intensa a criatividade didática. Dever-se-ia, porém, ter cuidado, pois, se forem construídos exercícios usando um modelo semelhante ao usado em exercícios de cinemática, correr-se-ia o risco de transformar a FMC em algo enfadonho.

III.3 Análise dos conteúdos em livros que abordam FQ/FMC

Já quanto à análise do conteúdo de livros que abordam a FQ/FMC, Vellentzas et al (2007) investigaram a maneira como experimentos de pensamento sobre a teoria da Relatividade e a MQ são apresentados em livros-texto e livros de divulgação da Física; e se eles poderiam despertar o interesse de estudantes e agir como material educacional para familiarizá-los com as teorias modernas da Física. Segundo o trabalho, experimentos de pensamento seriam ferramentas conceituais que possibilitariam aos cientistas estudarem o mundo físico, tendo importante papel no avanço da Ciência.

Os autores desenvolveram o estudo em fases: A) Localização dos experimentos de pensamento em seus textos originais e realização de sua classificação com o auxílio de quatro juízes (pesquisadores do campo da História da Ciência); B) Seleção e estudo de livros-texto baseando-se em seu público-alvo (último ano do nível secundário ou primeiro ano de universidade) e na presença de capítulos sobre a Relatividade e a MQ; e de livros de divulgação da Física baseando-se em sua popularidade mundial, na fama de seus escritores e na abordagem da Relatividade e/ou MQ. Uma pesquisa qualitativa com seis alunos de quatorze anos foi desenvolvida objetivando investigar se o experimento de pensamento “elevador de Einstein” poderia ser utilizado com estudantes da escola secundária como introdução ao princípio da equivalência.

Concluindo, os autores afirmam que os experimentos de pensamento foram amplamente usados pelos físicos que desenvolveram as teorias da Relatividade e da MQ e, após terem passado por processos de adaptação da linguagem e do formalismo matemático, constituiriam conteúdo insubstituível de livros-texto e de livros de divulgação da Física. Além disso, as técnicas narrativas utilizadas para apresentá-los teriam provado serem atrativas a estudantes secundários. Dessa forma, os autores defendem o uso dos experimentos de pensamento como ferramenta

não somente do pensamento propriamente dito, mas também da comunicação e da educação.

III.4 Elaboração e/ou aplicação de propostas de ensino

Quanto às propostas de ensino da FQ, começamos por descrever os trabalhos em que as propostas apresentadas não foram testadas.

Pospiech (1999) buscou identificar as principais dificuldades no ensino da teoria quântica e sugeriu o conceito de *spin*, abordado via experimentos mentais de Einstein, Podolsky e Rosen (EPR), como o ponto de partida para estudá-la. O autor afirma que falar qualitativamente sobre a teoria quântica seria praticamente impossível porque os conceitos e os termos por nós utilizados seriam desenvolvidos a partir de experiências diárias, isto é, nossa linguagem só seria adequada para descrever objetos físicos concretos. Assim, ele defende que ao menos alguns aparatos matemáticos da teoria quântica sejam abordados, pois sem esta sua estrutura formal seria impossível entendê-la.

O típico fenômeno quântico do *spin* é sugerido como a “porta de entrada” para o estudo da teoria quântica porque ele estaria no seu cerne; o procedimento pelo qual ele é descrito e sua simples estrutura matemática (matrizes) seriam típicos desta teoria; ele seria importante em experimentos modernos e o Princípio da Incerteza de Heisenberg poderia ser explicado consistentemente. Além disso, ele proporcionaria discussões acerca de aspectos filosóficos, em especial, as questões da realidade e objetividade da natureza.

Segundo o autor, referências a conceitos clássicos deveriam ser evitadas. Além disso, dever-se-ia evitar pensar o *spin* como algo relacionado a giro e se sugere o uso do termo “objeto quântico” em vez de onda ou partícula.

Finalizando, Pospiech (1999) ressalta que a computação quântica e o teleporte estão diretamente relacionados aos experimentos de EPR. Ademais, o estudo destes experimentos abriria a possibilidade de discussões filosóficas acerca da teoria quântica, propiciando aos estudantes revisitarem suas visões da natureza.

Andrade et al (2007) objetivaram identificar elementos de FMC em obras do pintor espanhol Salvador Dalí, a fim de que estas possam ser utilizadas como recursos didáticos no nível médio e na formação de professores. A ideia seria atrair os alunos através da arte, em um trabalho interdisciplinar.

As relações metafóricas estabelecidas entre algumas das pinturas de Dalí e os conteúdos de FMC foram apresentadas e a prova concreta dessa relação seria que palavras como atômico(a), nuclear, partículas, (des)materialização, desintegra-

ção, micro-física, mésons pi, raios cósmicos, fariam parte do título de diversas de suas obras.

Finalizando, os autores dizem que o pintor espanhol buscou comunicar a nova realidade científica com uma linguagem própria: a linguagem visual. Dessa forma, sugere-se que, através das pinturas de Dalí, realize-se uma revisão histórica das descobertas da Relatividade e da Quântica, ao passo que o encantamento pelo tema, promovido pela utilização de obras de arte no ensino de Física, facilitaria a assimilação de conceitos físicos por parte dos alunos, além de implementar uma “visão de contextualização sócio-cultural”.

Costa et al (2007), da mesma forma que Andrade et al (2007), procuraram explicitar relações entre a Física e as obras de Salvador Dalí.

Fanaro et al (2007) e Arlego (2008) descrevem a construção de uma proposta estrutural conceitual para ensinar conceitos fundamentais de MQ tendo como referência o método de caminhos múltiplos de Feynman.

Na proposta destes autores, não se adota a perspectiva dita por eles como tradicional, que apresentaria os conceitos da MQ seguindo a ordem histórica. Defende-se, também, que o conceito de fóton talvez não seja a forma mais simples de introduzir a MQ no nível secundário. Assim, os autores sugerem que a concepção de comportamento dual da matéria seja construída partindo-se do comportamento corpuscular e analisando a emergência do comportamento ondulatório. Para isso, simulações acerca do experimento da dupla fenda com partículas de massas cada vez menores desempenhariam papel central.

Assim como Pospiech (1999), os autores ressaltam que se deveria evitar o termo “partícula quântica”, por tender a confundir os estudantes, ao passo que a expressão segue enfatizando a ideia de partícula. Em vez disso, sugere-se o uso do termo “sistema quântico”.

Finalizando, os autores destacam que a adaptação do formalismo de caminhos múltiplos de Feynman (simplificando a matemática envolvida), aliada ao uso de simulações, pode auxiliar a aprendizagem de fundamentos da MQ no EM. A necessidade de testar a proposta em sala de aula também foi salientada.

Johansson e Milstead (2008) mostraram como o Princípio da Incerteza de Heisenberg poderia ser demonstrado em aulas de Física do nível médio sendo útil no entendimento de fenômenos físicos como a radioatividade e as forças de troca.

Tendo como concepção a ideia de que, quanto mais longa for uma explicação, menos atentos permanecerão os estudantes, os autores propõem que o tópico seja abordado a partir de uma situação já familiar a eles. Levando isso em conta, em conjunto com a pouca matemática “nova” a ser considerada, o experimento de difração por uma fenda é proposto para demonstrar os efeitos do referido princípio.

Sugere-se que apenas seja feita referência a Δx e Δp_x como os limites impostos pela natureza ao nosso conhecimento da posição e do momento de uma partícula, respectivamente, não sendo necessário introduzir o conceito de função de onda de uma partícula e discutir a superposição de estados. A própria expressão final formal do princípio não deveria ser apresentada no nível médio.

Finalizando, os autores afirmam que o Princípio da Incerteza seria um excelente ponto de partida para a discussão do bizarro mundo quântico.

Ostermann et al (2009), em contraponto à abordagem histórica da FQ que vem sendo adotada no EM – direcionando os tópicos à quantização da energia (radiação térmica, efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, entre outros) – defendem que a óptica ondulatória deve ser a “porta de entrada para o mundo quântico”, centrando-se nos conceitos de dualidade onda-partícula e da interpretação probabilística da FQ (mecânica ondulatória de Schrödinger). Um interferômetro virtual de Mach-Zehnder é sugerido como ferramenta didática e cultural. Seu uso poderia evidenciar o comportamento corpuscular ou ondulatório do fóton e possibilitaria trabalhar nos regimes quântico e clássico.

Segundo os autores, o aparato possui dois divisores de feixes, sendo equivalente a uma dupla fenda. Porém, haveria algumas vantagens em favor de seu uso didático em detrimento do uso do clássico experimento de dupla fenda. Operando em regime quântico, complicações relacionadas às escalas microscópicas envolvidas e às possíveis interações do fóton com as paredes e/ou com o material da dupla fenda, que poderiam representar obstáculos à aprendizagem (pois os estudantes poderiam atribuir o resultado observado aos ruídos externos), não existiriam com a utilização do interferômetro. Além disso, o esquema do interferômetro seria explorado em muitos textos técnicos e de divulgação científica devido à sua relação com a computação quântica, assim, levá-lo ao EM numa modalidade virtual, poderia proporcionar o entendimento do princípio básico da computação quântica: a superposição.

Finalizando, Ostermann et al (2009) defendem que a “nova” FQ, que vai muito além da quantização de energia, seja a essência do ensino da FQ no EM, pois nela estariam os conceitos revolucionários e o suporte para as novas aplicações tecnológicas. Já no âmbito da formação de professores, seria fundamental um trabalho mais conceitual e qualitativo da FQ desde o início do curso para que ela possa ser levada às escolas do nível médio através de abordagens mais conceituais, pois o formalismo matemático envolvido seria complexo.

A partir de agora, descrevemos os trabalhos em que as propostas apresentadas foram testadas.

Cuppari et al (1997) descrevem uma abordagem para ensinar aspectos da MQ desenvolvida tendo como base o trabalho de Planck sobre a existência de uma granularidade fundamental no espaço de fase. A proposta é introduzir a constante de Planck num estágio inicial do curso de Física usando exemplos clássicos de movimentos periódicos; introduzindo o conceito de ação (usualmente não abordado no currículo tradicional); discutindo a constante de Planck como o *quantum* de ação; discutindo os limites entre as Mecânicas Quântica e Clássica em termos da razão entre a ação do movimento e o *quantum* de ação e discutindo qualitativamente a quantização da energia em sistemas microscópicos.

Um teste parcial da implementação deste programa foi feito em uma turma de nível médio da Itália. Ele teria mostrado que não houve dificuldades particulares no que diz respeito ao entendimento das representações não usuais dos movimentos com variáveis do espaço de fase; em aceitar a ação como uma quantidade útil para descrever as situações e nem na apreciação da ordem de grandeza da constante de Planck.

Finalizando, os autores afirmam que o teste foi encorajador, ao passo que mostraria ser possível introduzir gradualmente conceitos importantes da MQ, num grau de formalismo comparável ao que é necessário ao entendimento da Mecânica Clássica.

Seguindo uma linha muito semelhante aos trabalhos de Fanaro et al (2007) e Arlego (2008), Fanaro et al (2009a) propõem a introdução da MQ no EM através de uma estrutura conceitual de referência baseada no método da integral de caminho de Feynman com uma abordagem não histórica e um formalismo complementar ao canônico.

Trinta estudantes (17-18 anos) com bom desempenho escolar e considerados detentores dos conhecimentos matemáticos e físicos requeridos compuseram um grupo de estudo onde a proposta foi testada. O trabalho em grupo, que era o método de trabalho utilizado habitualmente por estes alunos, foi mantido. A sequência didática foi composta por treze aulas e teve como ápice a explicação da “inesperada” distribuição de elétrons no experimento da dupla fenda.

Após a aplicação da proposta didática, um teste desenvolvido com o objetivo de detectar os conhecimentos construídos pelos estudantes foi aplicado. Segundo os autores, a análise das respostas pareceu indicar que os estudantes consideraram que o elétron tem um comportamento especial e característico (oito deles mencionaram explicitamente o termo “sistema quântico”); eles não tiveram dificuldade em utilizar a técnica da soma de todas as alternativas de Feynman; a maioria dos estudantes não foi capaz de aceitar a impossibilidade de conhecer qual seria a função que descreve o movimento de um elétron; os estudantes concordaram que

a técnica da soma de todas as alternativas é um mecanismo adequado para explicar o padrão de interferência observado no experimento da dupla fenda; os alunos entenderam que o comportamento ondulatório permite associar um comprimento de onda tanto para partículas macroscópicas quanto para partículas microscópicas; eles relacionaram a forma e a detecção do padrão de interferência para os casos macroscópico e microscópico; 60% deles disseram que, apesar de o padrão de interferência ser formado, ele nem sempre pode ser visto ou detectado; o conceito clássico de caminho no espaço foi um obstáculo ao entendimento do conceito de caminho estabelecido na sequência didática (dever-se-ia evitar a associação entre o caminho físico e a imagem de um único e determinístico caminho nos cursos de Física).

E por fim, os autores afirmam que o ensino de MQ requer uma ênfase na ideia de que a Física não trata da “realidade”, mas constrói modelos abstratos, dentro dos quais percepções já enraizadas são inapropriadas. Eles consideraram que a proposta esboçada é viável, mas apenas inicia a discussão, ao passo que deve ser avaliada por físicos, pesquisadores em Ensino de Física e professores, a fim de que possam ser respondidas questões como: Quais os obstáculos prévios à conceitualização dos conceitos da MQ?; O que poderia ser feito para auxiliar esse processo?; Que tipos de interação entre professor e alunos são melhores para apoiar o esforço cognitivo necessário à abordagem da sequência?

Otero et al (2009) avaliam a aplicação dessa mesma sequência didática para ensinar alguns conceitos fundamentais de MQ a alunos do último ano do ensino secundário argentino.

Testes escritos e registros de áudio foram analisados a fim de verificar a eficiência do processo. Com respeito à conceitualização de distribuição de probabilidade, quase todos os estudantes teriam conseguido distinguir, em termos da presença de máximos e mínimos, as curvas para bolas e elétrons que passam por uma fenda dupla. Com respeito à concepção do elétron como um sistema quântico, boa parte dos estudantes pareceu reconhecer o comportamento diferente do elétron em relação às partículas macroscópicas. No entanto, algumas respostas mostraram que eles ainda seguiam considerando o elétron como uma partícula, adicionando a ele, porém, a propriedade quântica. Já quanto ao uso da técnica da soma de todas as alternativas de Feynman, os autores notaram que, diferentemente do que foi relatado por Fanaro et al (2009a), os alunos encontraram dificuldades. Com respeito ao significado da constante de Planck e à transição quântico-clássica (princípio da correspondência), a maioria dos alunos referiu-se adequadamente à constante e parece ter compreendido o princípio da correspondência. Em relação ao uso de *softwares*, os estudantes reconheceram seu valor.

Otero et al (2009) consideraram os resultados aceitáveis e afirmam que o trabalho mostrou a viabilidade da sequência didática adotada para se ensinar aspectos da MQ.

Fanaro et al (2009b) também apresentam resultados da aplicação de parte de uma sequência didática sobre MQ a alunos do último ano do nível secundário. A proposta é alternativa à tradicional, ao passo que não segue uma estrutura histórica. Para analisar a viabilidade da proposta, foram utilizadas produções escritas pelos alunos (após cada atividade e ao final do curso), registros em áudio de atividades em grupo e um teste com as opiniões dos sujeitos sobre a sequência que começa e termina com o experimento da dupla fenda. Segundo os autores, esse experimento permite dar sentido à formulação probabilística que explica seus resultados.

Como referencial, adotou-se a teoria de campos conceituais de Vergnaud, segundo a qual os conceitos seriam definidos por três conjuntos: um conjunto de situações que dão sentido ao conceito; um conjunto de representações simbólicas que constituem seu significante e um conjunto de invariantes em que a operacionalidade do conceito é baseada (dando-lhe significado). Esses invariantes tornariam operatória a ação dos indivíduos frente às situações-problema e seriam elementos cognitivos denominados “conhecimentos-em-ação”, os quais, por sua vez, seriam constituídos por “conceitos-em-ação” (categoria que se considera relevante à situação) e “teoremas-em-ação” (proposição que se considera verdadeira acerca de uma dada situação). No entanto, um “conceito-em-ação” não seria um conceito e um “teorema-em-ação” não seria um princípio científico; eles seriam implícitos e psicológicos, ao passo que conceitos e teoremas seriam explícitos e científicos. Portanto, seria necessário conhecer como esses conceitos e teoremas-em-ação são gerados, a fim de levar os alunos, a partir desse conhecimento implícito, ao conhecimento científico explícito.

O trabalho foi desenvolvido com trinta estudantes de 17-18 anos de idade – formaram-se seis grupos que permaneceram fixos durante toda a sequência. Foram analisadas as duas primeiras situações da proposta aplicada, identificando-se alguns teoremas e conceitos-em-ação utilizados pelos alunos. A primeira situação diz respeito a imaginar a experiência da dupla fenda com bolas (realizar uma análise qualitativa da experiência). Sobre ela, os autores concluíram que os teoremas-em-ação utilizados são instáveis; ao ter que prever o que ocorreria, os estudantes utilizaram inicialmente o teorema-em-ação da distribuição uniforme (possivelmente devido à referência ao azar), porém, ao reconhecer a influência das fendas, utilizaram o teorema-em-ação de que as fendas impõem a forma da distribuição; depois

de introduzir a definição de probabilidade, houve evidência de que eles passaram a atribuir a forma da curva de probabilidade à presença das fendas.

A segunda situação diz respeito a uma simulação do experimento da dupla fenda através de um *software*. A tarefa inicial foi simular o experimento utilizando bolas, comparando o que era observado com as previsões feitas na primeira situação de aprendizagem. Os estudantes deveriam pensar na questão de por que, à medida que a separação entre as fendas é diminuída, surge um máximo na posição intermediária entre as duas, sendo que por ali não passam bolas (questão da superposição, da soma das curvas). O conflito entre o que era esperado e o que foi observado através da simulação foi o ponto de partida para a introdução dos elétrons como sistemas quânticos. Dessa segunda situação de aprendizagem, os autores concluíram que, para o caso das bolas, a soma das curvas foi, em geral, aceita explicitamente pelos grupos; ao invés de reconhecer as diferenças entre as curvas para o caso de bolas e de elétrons, os alunos focaram na existência de um máximo central para os dois casos, utilizando os teoremas-em-ação de que os elétrons podem atravessar paredes e de que eles são bolas muito pequenas, para explicar o que observaram, ou seja, apesar da surpresa, eles não utilizaram conceitos ondulatórios para explicar o padrão de interferência.

Finalizando, os autores afirmam que foi possível verificar o caráter oportunista da conceitualização combinado com a presença dos invariantes operatórios (teoremas e conceitos-em-ação) construídos durante a história cognitiva dos alunos, como a noção de elétrons como pequenas bolas capazes de atravessar paredes. Assim, deve-se evitar essa referida criação didática a respeito dos elétrons por ela funcionar como obstáculo à conceitualização do elétron como sistema quântico. Ademais, ressalta-se a importância da intervenção oportuna do professor e a necessidade de testar propostas e possíveis adaptações.

Sales et al (2008) analisaram resultados da aplicação de um objeto de aprendizagem denominado “pato quântico”, que utiliza atividades de modelagem exploratória para estudar o efeito fotoelétrico e calcular a constante de Planck.

O pressuposto do trabalho desses autores é que o uso de ambientes computacionais seria uma ferramenta para facilitar a aprendizagem. No caso da FMC, o uso de ferramentas virtuais se justificaria ainda mais pelas dificuldades envolvidas em uma abordagem concreta destes tópicos (material experimental de alto custo, dificuldades operacionais, entre outros).

O estudo foi realizado com trinta e dois estudantes de EM de um Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará. Após a finalização dos trabalhos, os alunos receberam um dossiê avaliativo na forma de múltipla escolha a fim de avaliar o uso do objeto de aprendizagem. 54% dos estudantes entenderam que a prin-

principal proposta do objeto de aprendizagem “pato quântico” era a compreensão do efeito fotoelétrico (e não apenas o cálculo de uma constante). Segundo 88% dos alunos, o objeto de aprendizagem utilizado foi motivador para aprender o conteúdo. 57% deles disseram ter sido a interatividade o principal motivo da viabilidade do aparato. Já 31% afirmaram que, por ser divertido, o “pato quântico” permite uma melhor aprendizagem. Em suma, a maior parte dos usuários teria considerado viável, fácil e objetivo o uso desta tecnologia com o conteúdo proposto. Paralelamente a isso, os pesquisadores acreditam que a interação dos alunos com o ambiente virtual resultou em uma aprendizagem significativa do efeito fotoelétrico.

Sales et al (2008) concluem afirmando que os objetos de aprendizagem podem funcionar como ferramentas prazerosas de descobertas e facilitadores do desenvolvimento cognitivo – os alunos teriam indicado satisfação, curiosidade e espírito investigativo.

Carvalho Neto et al (2009) descrevem os resultados da aplicação de uma proposta didática para ensinar aspectos da MQ, em especial, seu caráter preditivo probabilístico.

Baseando-se na teoria da aprendizagem significativa, a concepção de previsão, já existente na estrutura cognitiva dos alunos, foi tomada como âncora para o conceito de previsão física. Além disso, a apresentação da MQ foi proposta sem referências analógicas à Mecânica Clássica e sugerindo que seja feita distinção entre as ideias de ambas.

Segundo esses autores, estudantes do Nível Médio têm, erroneamente, atribuído o aspecto preditivo probabilístico da MQ a uma ignorância no que diz respeito ao conhecimento sobre o sistema quântico em questão. Essas concepções alternativas seriam resistentes à mudança porque também seriam frutos de aprendizagens significativas. Assim, não se espera um abandono delas, mas sim a aquisição da consciência de que elas estão erradas no contexto da ciência.

A pesquisa relatada é qualitativa e baseada na observação participativa, coleta, análise e interpretação das informações. Os sujeitos foram dez alunos do terceiro ano do EM de uma escola privada de Salvador. Cinco deles fizeram parte da fase exploratória do estudo e outros cinco da fase onde uma nova abordagem para o ensino de MQ foi aplicada. Em cada fase, pré-testes, entrevistas prévias, um minicurso e entrevistas finais foram realizados.

Nas entrevistas preliminares, nenhum dos cinco estudantes da fase exploratória do estudo fez distinção entre os significados macroscópico e microscópico de probabilidade. Haveria a ideia de que probabilidade é a expressão de uma falta de conhecimento exato. Com o pré-teste, teria sido identificado que os estudantes têm uma clara conceituação do que é previsão no senso comum, mas que eles não a

veem como uma característica das teorias físicas. Já a análise das entrevistas feitas após o minicurso mostrou que: os cinco estudantes pareceram ter entendido a incompatibilidade entre os conceitos de trajetória e o princípio da incerteza; os cinco estudantes reconheceram que a MQ não proíbe a medida da posição ou da quantidade de movimento, mas sim, a medida simultânea de ambas; a maioria dos estudantes entendeu que o uso de probabilidades na MQ não é reflexo da ignorância humana, como, em geral, na escala macroscópica; alguns estudantes vêem a MQ como uma teoria não preditiva por ela utilizar-se de probabilidades. Essa última constatação foi utilizada como guia para a definição das estratégias adotadas durante a aplicação subsequente, em que a construção de significados sobre a natureza preditiva probabilística se deu a partir da discussão do experimento da dupla fenda com elétrons.

Em geral, os autores concluíram que houve aprendizagem significativa acerca das previsões essencialmente probabilísticas da MQ. As evidências para essa conclusão foram que os estudantes reconheceram que o ato de preparar e observar um dado sistema físico, em uma dada circunstância, define o fenômeno como ondulatório ou corpuscular (do ponto de vista da complementaridade); os estudantes perceberam que o elétron não é nem uma partícula clássica nem uma onda clássica e que há diferença entre o estado quântico físico (descrito por uma função ψ) e o estado clássico (definido por posição e velocidade).

Finalizando, Carvalho Neto et al (2009) dizem que, para a aprendizagem significativa do aspecto preditivo das teorias físicas, é necessária a existência de um subsunçor (neste caso, a ideia de previsão advinda do “senso comum”).

Alguns trabalhos dedicam-se, prioritariamente, a avaliar resultados de propostas de ensino de FQ aplicadas. Pinto e Zanetic (1999), por exemplo, apresentam algumas reflexões sobre o ensino de FQ após o comportamento da luz ter sido abordado com alunos do segundo ano do EM de uma escola pública do Estado de São Paulo. O professor de física dos alunos era o primeiro autor do artigo.

A fim de superar as dificuldades de se introduzir a FQ no EM, a do formalismo matemático, a do tratamento experimental e a do distanciamento entre ela e a Física Clássica, sugere-se uma abordagem onde sejam utilizadas diferentes interpretações do formalismo quântico e a História e Filosofia da Ciência como estratégia de ensino.

Tomam-se como referenciais algumas obras de Bachelard, o qual teria afirmado que diferentes formas de pensar coexistem num mesmo sujeito, sendo usadas em diferentes domínios. Haveria um caminho a ser percorrido entre o pensamento mais primitivo e o mais elaborado. O gráfico do perfil epistemológico de uma pessoa acerca de um dado assunto poderia ser feito, idealmente, estabelecendo

as filosofias sucessivas no eixo horizontal e a frequência de utilização destas filosofias no eixo vertical.

Buscando esboçar o perfil epistemológico dos alunos, a fim de levantar suas tendências filosóficas a respeito da natureza da luz, foi elaborado e aplicado um teste e feito o gráfico do perfil epistemológico de cada aluno.

Um minicurso centrado no tópico “luz” foi desenvolvido com os alunos durante doze aulas. Descrições históricas, aspectos filosóficos, atividades experimentais e atividades lúdicas foram alguns dos métodos adotados. Um sistema de avaliação aberto foi utilizado, sendo este constituído pelo teste do perfil epistemológico; pela elaboração de trabalhos de divulgação sobre FQ; e pela redação de um relatório final, em que impressões, comentários e críticas ao minicurso podiam ser feitas.

A partir dos relatórios dos estudantes, os autores concluíram que é necessário ter atenção à linguagem a ser usada nos materiais didáticos e durante as aulas; devem-se indicar outras referências para que os alunos possam estudar o tema (entra aí a necessidade de bibliotecas bem equipadas); deve-se enfatizar a atividade experimental (mas sem supervalorizá-la), explicitando a relação teoria-experimento; deve-se (re)valorizar o formalismo da física, sem, contudo, aceitar o “formulismo” tradicional no EM; a utilização de diferentes interpretações para um mesmo fenômeno pode permitir que cada aluno desenvolva sua própria interpretação; atividades diversificadas agiram positivamente sobre os alunos que não se interessavam pela Física quando esta não era relacionada à cultura: “Física Quântica também é cultura”.

Finalizando, os autores afirmam que o resultado da pesquisa reforça a ideia da importância dos originais da História da Física no diálogo entre diferentes concepções. Eles defendem que a História e a Filosofia da Ciência não agem apenas como fatores motivacionais, mas, também, como facilitadores da construção conceitual e cultural da Física. Os alunos que participaram do minicurso teriam ao menos sido apresentados à FQ, apesar de os autores acreditarem que eles aprenderam pouco sobre este tema. Porém, eles questionam: “quantos alunos que passam por um curso de Mecânica Clássica entendem realmente as leis de Newton?”.

Olsen (2002) examinou como alunos do nível secundário da Noruega constróem sentidos sobre o tópico dualidade onda-partícula.

O autor defende que tópicos como o efeito fotoelétrico e os raios-X poderiam ser entendidos a partir do modelo errôneo de Bohr, não constituindo um desafio à visão de mundo clássica. Já a dualidade onda-partícula seria um fenômeno que desafiaria profundamente essa visão.

O autor chama a atenção para o efeito linguístico do uso dos termos “elétrons” e “luz”. O fato de que a palavra “elétron” pode ser dita no plural (elétrons) daria a conotação que eles são separáveis – propriedade única das partículas. Já a palavra “luz” não pode ser flexionada para o plural, o que daria a conotação de algo que não pode ser dividido. Consequentemente, ao falar sobre a natureza corpuscular da luz, seria necessário usar expressões como partículas de luz ou, então, introduzir o conceito de fóton.

O estudo foi realizado com 236 estudantes (de vinte diferentes escolas norueguesas escolhidas aleatoriamente) após eles terem finalizado suas aulas sobre FQ. Os participantes responderam a um questionário sobre os tópicos de FQ estudados.

As respostas dos estudantes teriam mostrado que a maioria deles não reconheceu a natureza similar da luz e dos elétrons, apesar dos argumentos de simetria apresentados nas aulas e nos livros-texto utilizados. Em geral, os elétrons foram vistos como partículas e a luz como tendo um comportamento dual.

A partir desse resultado, o autor questiona a abordagem do ensino que introduz a FQ fazendo referência à dualidade onda-partícula. Segundo ele, haveria outros conceitos que mostrariam melhor o quanto essa teoria se distancia de nosso ponto de vista tradicional, como o princípio da incerteza, por exemplo. Inclusive, ele afirma que outros estudos têm mostrado que a dualidade onda-partícula é um conceito de difícil compreensão, mesmo para estudantes universitários.

Concluindo, Olsen (2002) diz que abordar a FQ deveria levar os estudantes a entenderem e a se espantarem em relação ao quanto ela difere da Física Clássica, e não apenas capacitá-los a realizar cálculos envolvendo situações onde a quântica é aplicada.

Paulo e Moreira (2004) buscaram estudar de que maneira estudantes do EM constróem alguns conceitos quânticos fundamentais.

O estudo foi desenvolvido em duas escolas da rede particular de Cuiabá durante doze a quinze aulas. Em uma dessas escolas, participaram três turmas de primeira série do EM (cerca de oitenta alunos). A primeira autora do artigo era a professora de Física das turmas e, dessa forma, conhecia bem os alunos, o que foi considerado, pelos autores, um requisito importante para criar condições de ocorrência de aprendizagem significativa. O tópico “Experimento de Dupla Fenda e suas implicações filosóficas” foi abordado adotando-se a interpretação de Copenhague após os alunos terem tido aulas sobre mecânica ondulatória. A pesquisa foi refeita em outra escola privada com turmas do segundo ano do EM. Porém, dessa vez, os alunos tiveram contato com a MQ sem que tivessem tido qualquer contato formal anterior com a mecânica ondulatória. Questões escritas subjetivas e objeti-

vas constituíram a forma de avaliação. Uma categorização das respostas dadas pelos alunos foi feita com base na técnica de análise fenomenográfica. Foi feita uma classificação em ordem crescente com relação ao nível de aproximação entre elas e o que é aceito pela comunidade científica na interpretação de Copenhagen.

Os autores chamam a atenção para o fato observado de que, após a aplicação da metodologia didática, os alunos pareceram ter adquirido consciência de que, em Ciência, não há verdades absolutas. Com relação ao efeito dos conhecimentos prévios como facilitadores ou obstáculos na construção do conceito de dualidade, a conclusão foi de que eles parecem não ter influenciado decisivamente, uma vez que os resultados nas duas escolas foram bastante semelhantes. Surgem, dessa forma, duas possíveis explicações a serem investigadas: ou os alunos não aprenderam Física Clássica significativamente, ou a Física Clássica não constitui um obstáculo epistemológico à aprendizagem de FQ.

III.5 Concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EM

Finalmente, com respeito às concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EM, Monteiro et al (2009) investigaram por que, embora a introdução de FMC no EM venha sendo sugerida por pesquisadores, alguns professores ainda não a tratam com a mesma prioridade. Para isso, algumas questões guiaram o trabalho: O que os professores consideram como mais relevante para as aulas de Física?; Qual a importância atribuída por esses professores à introdução da FMC no Ensino Médio?; Com quais obstáculos esses professores se deparam para introduzirem a FMC no Ensino Médio, e em que medida essas dificuldades estão relacionadas com suas formações profissionais?

O estudo foi realizado analisando-se os discursos de cinco professores de Física de um município da região nordeste brasileira que atuavam no EM. Para isso, eles participaram de uma entrevista semiestruturada posteriormente analisada, tendo como referenciais alguns aportes da análise de discurso da linha francesa; da formação de professores e do planejamento curricular (na perspectiva crítica da educação); e do debate em torno da inserção de FMC no EM.

Os autores constataram que os professores entrevistados nunca haviam introduzido FMC em seus planejamentos de ensino. Além disso, eles disseram desconhecer quem o fizesse. Entretanto, todos eles declararam a relevância dessa proposta, tendo sido suas justificativas para isso consonantes com o discurso de documentos oficiais da educação brasileira.

Mas, então, de onde viria essa separação pensar/agir em termos da inserção da FMC no EM? Alguns professores alegaram que o tempo é muito escasso

em relação à quantidade de conteúdos a serem trabalhados. Disseram, também, que, se tivessem tempo, introduziriam esses tópicos no último ano do EM, após abordar toda Física Clássica. Aliás, a percepção de que na FMC predomina o formalismo matemático foi recorrente, o que poderia ser resultado da formação que esses professores tiveram. Assim, eles teriam dificuldade em estruturar o tratamento desses tópicos de outras maneiras que não aquela a que foram submetidos. Além disso, alguns professores, apesar de considerarem satisfatórias suas formações em termos de FMC, disseram não possuir autonomia suficiente para ensinar esses tópicos.

E por fim, os autores concluem dizendo que, embora haja muitas justificativas para que se insira FMC no EM, não foi observado o mesmo entusiasmo entre os professores de Física analisados. Percebeu-se que suas formações foram pautadas particularmente na racionalidade técnica, havendo separação entre “disciplinas pedagógicas” e “disciplinas de conteúdos específicos”. Portanto, esses professores encontrariam dificuldade em propor estratégias de ensino para a FMC objetivando possibilitar aos alunos a construção de uma visão cultural e coerente da Ciência, do trabalho científico e de suas implicações sociais. Dessa forma, Monteiro et al (2009) defendem mudanças urgentes na formação de professores de Física, a fim de que a introdução da FMC no EM seja, de fato, viabilizada.

IV. A natureza das contribuições dos artigos sobre o ensino de FQ no EM

Nesta seção, esboçamos algumas considerações acerca da natureza das contribuições dos artigos sobre o ensino de FQ no EM.

Os trabalhos de revisão da literatura funcionam como organizadores dos resultados já obtidos em pesquisas, como sintetizadores daquilo que já é conhecido cientificamente. Assim, pode-se dizer que os três trabalhos classificados na categoria “Revisão da literatura sobre o ensino de FQ/FMC” resumem as contribuições da pesquisa em Ensino de Ciências para que a FQ e, de forma mais geral a FMC, possam ser ensinadas – considerando, obviamente, os locais de pesquisa e períodos pesquisados nesses trabalhos.

Já os trabalhos que fazem análises curriculares permitem analisar e discutir as necessidades a serem sanadas em termos de formação para o estudante de um determinado curso. Além disso, esses trabalhos permitem comparar as indicações dadas por diferentes propostas curriculares.

Quanto aos trabalhos que analisam os conteúdos de livros, podemos dizer que eles cumprem importante papel como consequência do fato de que esses recur-

tos podem ser utilizados pelos professores em aula. Dessa forma, o artigo classificado na categoria “Análise dos conteúdos em livros que abordam FQ/FMC” pode auxiliar o docente de Física a selecionar criticamente o material que trabalhará em suas aulas.

Os estudos que apresentam propostas de ensino de FQ e/ou avaliações de propostas de ensino aplicadas fornecem aos professores alternativas para basearem sua prática, isto é, amparam o trabalho docente ao passo que indicam sugestões de atividades a serem desenvolvidas. Além disso, os trabalhos que avaliam propostas de ensino aplicadas permitem verificar a efetividade destas propostas, isto é, podem mostrar as virtudes e as falhas de certo plano executado, facilitando, portanto, a reprodução das propostas em outras situações. Assim, os artigos alocados na categoria “Elaboração e/ou Aplicação de Propostas de Ensino” contribuem de forma substancial para a abordagem da FQ/FMC no EM ao fornecer subsídios ao professor para que possa efetivar as sugestões curriculares e de pesquisadores da área de Ensino de Física.

Os trabalhos que analisam as concepções de professores evidenciam suas posições sobre certo assunto. No caso da inserção da FQ/FMC no EM, isso é fundamental, uma vez que são os docentes aqueles que podem, de fato, vir a ensinar tópicos de FMC a seus alunos do EM. Daí a grande relevância do trabalho classificado na categoria “Concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EM”.

É fato que, se comparadas, algumas pesquisas apresentam resultados contraditórios, o que torna a questão ainda mais instigante. Estão em jogo posições e condições de produção dos pesquisadores.

V. Considerações finais

A pertinência de se ensinar FQ no EM parece ser cada vez mais consensual entre os pesquisadores do Ensino de Física. Os estudos sobre esse assunto apresentam muitas justificativas para que isso deva ocorrer.

A busca por alternativas para que esse ensino seja efetivado nas escolas é bastante necessária e a realização de pesquisas em sala de aula nos parece o caminho para obtenção destas alternativas. Complementarmente a isso, é urgente a necessidade por uma formação inicial do professor, para que ele, quando estiver em sala de aula, sinta-se capaz de ensinar esses tópicos, pois de outra forma, a abordagem da FQ no EM não evoluirá do *status* de pertinência para o status de realidade em grande parte dos cursos de EM. Não podemos nos esquecer de que o principal elo da corrente da inserção de tópicos de FMC no EM é o professor: apenas ele pode, de fato, efetivar movimentos nesse sentido. Essa constatação

aponta para a necessidade de se pensar a FQ na formação inicial, mas também na continuada.

No levantamento de pesquisas realizado neste estudo, encontramos 16 propostas de ensino e/ou aplicação de propostas de ensino de FQ. É um número pequeno, se considerarmos o amplo espectro de assuntos possíveis relacionados a esse conteúdo.

Por outro lado, encontramos um único trabalho relacionado a concepções de professores sobre o ensino de FQ/FMC no EM. Dado que o professor é, sem dúvida, o principal mediador em sala de aula, registramos, aqui, a importância da realização de maior número de estudos voltados para a compreensão do imaginário dos docentes de Física sobre esse ensino e também sobre as dificuldades encontradas por aqueles que buscaram realizá-lo.

Há, ainda, que se considerar que, embora existam divergências quanto ao papel que deva assumir a Física Clássica ao se abordarem conceitos de FQ e quanto à adoção ou não de uma abordagem que siga um percurso histórico, há certo consenso na questão de que só faz sentido levar a FQ para o EM se for privilegiado seu caráter qualitativo, conceitual, filosófico, cultural, em detrimento de um enfoque excessivamente matemático. Dentro dessa perspectiva, destaca-se o uso de textos de divulgação científica, de textos originais de cientistas, de simulações computacionais e de experimentos de pensamento. Essas estratégias, além de atuarem em prol da construção conceitual e cultural, poderiam, também, possibilitar a compreensão da maneira humana como a Ciência é construída, evidenciando que, nela, são criados modelos tentando explicar a realidade.

Por outro lado, constatamos que há algumas propostas em relação aos conteúdos de FQ que poderiam ser apresentados no EM, incluindo as formas de fazê-lo. Há aquelas que defendem que o conceito de dualidade onda-partícula seria central. Já outras, advogam a importância da interpretação probabilística da FQ, ou do Princípio da Incerteza de Heisenberg, ou, ainda, do conceito de *spin*. Simultaneamente, contrariando essas distinções, há certo consenso na ideia de que seria necessário abordar a “nova” FQ, não se limitando apenas ao efeito fotoelétrico, aos raios-X e à quantização da energia.

Quando consideramos o EM, é fato que a própria Física Clássica apresenta razoável nível de abstração. E, sem dúvida, a FQ se distancia profundamente da Física Clássica, alicerçando-se em paradigmas bastante distintos, a ponto de parecer algo que só existe em teoria. Entretanto, também é fato que a maioria das tecnologias atuais e prováveis futuras estão relacionadas a elaborações sobre os seus princípios. Artefatos consequentes da FQ são comuns em nossa sociedade, o que

coloca a possibilidade de estudá-los na escola numa perspectiva de compreensão da nossa cultura.

Finalizamos ressaltando, novamente, a necessidade de realização de mais trabalhos sobre o ensino de FQ no EM, de forma a ampliar o conhecimento sobre o assunto, tendo em vista aumentar a possibilidade de o professor trabalhá-la em sala de aula.

VI. Referências Bibliográficas

ANDRADE, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Influências da física moderna na obra de Salvador Dalí. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, 2007. Disponível em:

<<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6243/5794>>. Acesso em: 03 maio 2011.

ARLEGO, M. J. F. 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**, ano 3, n. 1, 2008. Disponível em:

<http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano-3-nro-1/REIEC_anio3_num1_art6.pdf?attredirects=0> Acesso em: 03 maio 2011.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna? **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, 2005. Disponível em:

<http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID136/v10_n3_a2005.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

CARVALHO NETO, R. A.; FREIRE JÚNIOR, O.; SILVA, J. L. P. B. Improving students' meaningful learning on the predictive nature of quantum mechanics. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009. Disponível em:

<http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID207/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 18, n. 3, p. 298-316, dezembro de 2001. Disponível em:

<<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6666/6136>>. Acesso em: 03 maio 2011.

COSTA, R. R. D.; NASCIMENTO, R. S.; GERMANO, M. G. Salvador Dalí e a mecânica quântica. **A física na escola**, v. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a06.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

CUPPARI, A.; RINAUDO, G.; ROBUTTI, O.; VIOLINO, P. Gradual introduction of some aspects of quantum mechanics in a high school curriculum. **Physics Education**, v. 32, n. 5, 1997. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/32/5/012/pdf/0031-9120_32_5_012.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

FANARO, M. A.; ARLEGO, M.; OTERO, M. R. 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**, v. 24, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/1090/849>>. Acesso em: 03 maio 2011.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; ARLEGO, M. Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 1, 2009a. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID205/v14_n1_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

FANARO, M. A.; OTERO, M. R.; MOREIRA, M. A. Teoremas-en-acto y conceptos-ena-cto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 9, n. 3, 2009b. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revistas/V9N3/v9n3a1.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 6, n. 1, 2001. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID179/v6_n1_a2001.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

JOHANSSON, K. E.; MILSTEAD, D. Uncertainty in the classroom – teaching quantum physics. **Physics Education**, v. 43, n. 2, 2008. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/43/2/006/pdf/0031-9120_43_2_006.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

LOBATO, T.; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de teoria quântica nos currículos de física do ensino médio. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 1, 2005. Disponível em:

<<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/include/getdoc.php?id=226&article=88&mode=pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

MACHADO, D. I.; NARDI, R. Construção e validação de um sistema hipermédia para o ensino de física moderna. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 6, n. 1, 2007. Disponível em:

<http://saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen6/ART6_Vol6_N1.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

MONTEIRO, M. A.; NARDI, R.; BASTOS FILHO, J. B. A Sistemática Incompreensão da Teoria Quântica e as Dificuldades dos Professores na Introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 3, 2009. Disponível em:

<<http://www2.fc.unesp.br/cienciaeducacao/include/getdoc.php?id=2319&article=735&mode=pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

MOREIRA, M. A. A física dos quarks e a epistemologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 2, p. 161-173, 2007. Disponível em:

<<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/060611.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, Seção Pesquisa em Ensino de Física, 2007. Disponível em:

<<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/061108.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

OLSEN, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. **International Journal of Science Education**, v. 24, n. 6, 2002. Disponível em:

<<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a713864805~frm=titlelink>>. Acesso em: 03 maio 2011.

OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. H.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Fundamentos da física quântica à luz de um interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v. 8, n. 3, 2009. Disponível

em: <http://saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen8/ART18_Vol8_N3.pdf>.
Acesso em: 03 maio 2011.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, 2000. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID57/v5_n1_a2000.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

OTERO, M. R.; FANARO, M. A.; ARLEGO, M. Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, ano 4, n. 1, 2009. Disponível em: <http://reiec.sites.exa.unicen.edu.ar/ano4-nro-1/REIEC_anio4_num1_art6.pdf?attredirects=0>. Acesso em: 03 maio 2011.

PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 4, n. 2, 2004. Disponível em: <<http://www.fae.ufmg.br/abrapec/revistas/V4N2/v4n2a6.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, 2009. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID224/v14_n3_a2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 16, n. 1, 1999. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6873/6333>>. Acesso em: 03 maio 2011.

POSPIECH, G. Teaching the EPR paradox at high school? **Physics Education**, v. 34, n. 5, 1999. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0031-9120/34/5/307/pdf/0031-9120_34_5_307.pdf>. Acesso em: 03 maio 2011.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. 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**, v. 30, n. 3, Seção Produtos e Materiais Didáticos, 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/303501.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.

VELENTZAS, A.; HALKIA, K.; SKORDOULIS, C. Thought Experiments in the Theory of Relativity and in Quantum Mechanics: Their Presence in Textbooks and in Popular Science Books. **Science & Education**, v. 16, n. 3-5, 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/784gk6rx6052w210/fulltext.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2011.