

**SOBRE O ENSINO DE FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA: UMA REVISÃO DA  
PRODUÇÃO ACADÊMICA RECENTE<sup>1</sup>**  
(Modern and contemporary physics teaching: a review on recent literature)

**Alexsandro P. Pereira** [alexsandro.pereira@ufrgs.br]  
**Fernanda Ostermann**<sup>2</sup> [fernanda.ostermann@ufrgs.br]

Instituto de Física  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Caixa Postal 15051  
91501-970, Porto Alegre, RS

### **Resumo**

O presente trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o ensino de física moderna e contemporânea realizada através da consulta a artigos publicados nas principais revistas de ensino de ciências do Brasil e do exterior no período de 2001 a 2006. A pesquisa concentrou-se nos trabalhos direcionados ao ensino e resultou numa amostra de 102 artigos. Os trabalhos consultados foram classificados em quatro grandes categorias: propostas didáticas testadas em sala de aula, levantamento de concepções, bibliografia de consulta para professores, análise curricular. É possível constatar que, apesar do notável aumento relativo de publicações sobre o ensino de física moderna e contemporânea que apresentam resultados de pesquisa, a maioria dos artigos ainda se refere à bibliografia de consulta para professores. Embora haja um número considerável de estudos envolvendo propostas didáticas inovadoras, há poucos trabalhos que investigam os mecanismos envolvidos no processo de construção de conhecimentos relativo a temas de física moderna e contemporânea em sala de aula.

**Palavras-chave:** ensino de física moderna e contemporânea, pesquisa em ensino de física, revisão da literatura.

### **Abstract**

This paper presents a review of the literature on the teaching of modern and contemporary physics performed by consulting the articles published in leading Brazilian and international journals of science education in the period 2001 to 2006. The research focused on the papers targeted to education and it resulted in a sample of 102 articles. The studies reviewed were classified into four broad categories: didactical proposals tested in classroom, bibliographical reference to teachers, survey of misconceptions, curriculum analysis. It is possible to note that, despite a significant increase on publications on the teaching of modern and contemporary physics presenting research results, most articles still refer to bibliographical reference for teachers. Although there are a considerable number of studies involving new teaching proposals, there are few studies that investigate the mechanisms involved in the process of building knowledge related to topics of modern and contemporary physics in the classroom.

**Key-words:** modern and contemporary physics teaching, research on physics teaching, review of the literature.

### **Introdução**

Devido ao crescente número de publicações de artigos sobre estudos relativos ao ensino de física moderna e contemporânea (FMC), desde as revisões bibliográficas de Ostermann e Moreira

---

<sup>1</sup> Versão ampliada de um trabalho apresentado no VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Florianópolis, 26 a 31 de novembro de 2007.

<sup>2</sup> Auxílio parcial do CNPq.

(2000) sobre o tema “física moderna e contemporânea no ensino médio” e de Greca e Moreira (2001) sobre o ensino de conteúdos introdutórios de mecânica quântica (MQ), consideramos oportuna uma nova revisão da literatura sobre referido tema. O presente trabalho é uma versão ampliada de uma revisão bibliográfica apresentada sob a forma de comunicação oral no VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências (PEREIRA e OSTERMANN, 2007). Essa pesquisa envolveu a consulta a artigos em revistas da área de ensino de ciências do Brasil e do exterior, publicados no período de 2001 a 2006, e abrangeu trabalhos sobre o ensino de FMC em todos os níveis de ensino.

A partir dos trabalhos consultados, foi possível classificá-los em quatro grandes categorias: 1) propostas didáticas testadas em sala de aula; 2) levantamento de concepções; 3) bibliografia de consulta para professores; 4) análise curricular.

A primeira categoria refere-se à implementação de novas estratégias didáticas que visam promover nos estudantes um melhor entendimento de temas contemporâneos. Tais estratégias envolvem mudança de enfoque, uso de tecnologias da informação e comunicação, inovações didáticas, entre outros. A segunda categoria engloba trabalhos que avaliaram o conhecimento de professores e alunos acerca de temas de FMC. Essa categoria inclui o levantamento de modelos mentais, invariantes operatórios, modos de raciocínio, perfis conceituais e concepções errôneas relativas a temas específicos. A terceira categoria trata de bibliografias de consulta direcionadas a professores de física, tanto de nível médio como de nível universitário, incluindo textos de apoio, recursos didáticos, propostas de unidades didáticas e divulgação científica. Por fim, a quarta categoria refere-se aos trabalhos que se dedicaram à análise curricular ou outros tipos de análise relevantes para o ensino de FMC, como a análise de livros didáticos.

Cabe salientar que a categorização descrita acima não é a única possível e que alguns trabalhos encontram-se citados em mais de uma categoria. Chamamos a atenção para o fato de que não é objetivo dessa revisão fazer qualquer análise crítica a respeito do material consultado. Embora essa possa ser uma limitação do presente trabalho, já que alguns artigos poderiam, em princípio, conter erros conceituais, sem falar do fato de que a maioria deles incorpora parte da controvérsia existente entre os cientistas acerca da interpretação e dos fundamentos das teorias contemporâneas, acreditamos que essa opção não compromete a qualidade do nosso trabalho que tem por objetivo apresentar um panorama geral dos artigos publicados no período de 2001 a 2006. Sendo assim, fazemos a ressalva de que as diferentes posições tomadas pelos autores consultados, com relação ao ensino de FMC, não são necessariamente compartilhadas pelos autores do presente trabalho.

## **Metodologia**

Para a realização desse trabalho, foi utilizada a seguinte metodologia de pesquisa: i) levantamento do universo de trabalhos sobre o ensino de FMC posteriores à revisão de Ostermann e Moreira (2000); ii) definição do temas presente nos artigos consultados; e iii) classificação e categorização dos trabalhos.

O universo de trabalhos é constituído do total de artigos publicados nas principais revistas de ensino de ciências do Brasil (A Física na Escola, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Ciência & Educação, Ensaio – Pesquisa em Educação em Ciências, Investigações em Ensino de Ciências, Revista Brasileira de Ensino de Física e Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências) e do exterior (*American Journal of Physics*, *Enseñanza de la Ciencias*, *International Journal of Science Education*, *Physics Education*, *Revista Electrónica de Enseñanza de la Ciencias*, *Science Education* e *Science & Education*) no período de 2001 a 2006. O critério de seleção dessas revistas foi feito com base no sistema de avaliação da Capes (Qualis) relativo à área de ensino de ciências e

matemática. Devido ao grande número de revistas, foram incluídas apenas aquelas classificadas como Nacional A, Nacional B e Internacional A<sup>3</sup>.

A pesquisa se concentrou nas publicações direcionadas ao ensino de física, evitando assim “artigos gerais” que pudessem “distorcer” nossa amostragem. De acordo com esse critério, evitamos artigos sobre descrições experimentais, cálculos teóricos, debates filosóficos e estudos sobre a história da física. Por exemplo, trabalhos como o de Mario Bunge (2003) sobre a falsidade da interpretação de Copenhagen assim como o de Freire Jr. (2003) sobre a institucionalização da controvérsia em física quântica foram excluídos. Isto não significa dizer que artigos dessa natureza não tenham implicações para a pesquisa em ensino de física – eles certamente têm. No entanto, classificar esses trabalhos como artigos de ensino implicaria um reducionismo difícil de justificar.

Em geral, a discriminação entre “artigos de ensino” e “artigos gerais” sem sempre resulta em uma tarefa fácil. Nesse trabalho, essa dificuldade se intensificou durante o levantamento de artigos em revistas como *American Journal of Physics*, *Science & Education* e Revista Brasileira de Ensino de Física. Devido à subjetividade envolvida no processo de seleção e classificação de artigos, é possível que alguns trabalhos tenham passado inadvertidos. O processo como um todo teve início em janeiro de 2007 e resultou em uma amostra de 102 trabalhos.

A definição dos temas (levantamento de concepções, avaliação de novas estratégias didáticas, o uso de tecnologias da informação e comunicação, etc.) foi feita com base na análise do conteúdo presente nos artigos e procurou-se desde o início verificar os objetivos dos trabalhos a fim de enquadrar a diversidade de temas em categorias que fossem mais abrangentes.

As categorias utilizadas na presente revisão, por sua vez, foram elaboradas com base na classificação proposta por Ostermann e Moreira (2000). Embora esse trabalho tenha servido de referência para a presente revisão, existem aspectos importantes que diferenciam os dois estudos. O primeiro refere-se a trabalhos sobre a temática FMC no ensino médio e foi realizada através da consulta a diversos veículos tais como artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela *internet*. A presente revisão, por outro lado, visa à produção acadêmica recente e envolveu apenas a consulta a revistas da área de ensino de ciências e matemática, incluindo trabalhos realizados em todos os níveis de ensino. Sendo assim, a classificação utilizada no presente trabalho não reproduz as mesmas categorias propostas por Ostermann e Moreira (2002), embora tenha sido fortemente orientada por elas.

## Descrição dos trabalhos

### *Propostas didáticas testadas em sala de aula*

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam novas estratégias para o ensino temas de FMC e apresentam resultados de experiências didáticas. Foi possível identificar, grosso modo, cinco linhas de pesquisa: 1) estratégia para abordar FMC no ensino médio; 2) mudanças no ensino de FMC em nível superior; 3) uso de tecnologias de informação e comunicação; 4) abordagem ciência, tecnologia e sociedade; 5) articulação com a história e a filosofia das ciências.

#### *Estratégia para abordar FMC no ensino médio*

Utilizando materiais de divulgação científica como recurso didático, Silva e Kawamura

---

<sup>3</sup> A revista *A Física na Escola* é uma exceção ao critério de seleção exposto acima. Por se tratar de uma revista dirigida a professores de ensino médio que contempla artigos escritos por importantes pesquisadores da área de ensino de ciências, optamos por incluí-la na amostragem.

(2001) abordaram o tema dualidade onda-partícula nas aulas de óptica no ensino médio. A partir de uma “estratégia de perguntas”, uma série de questões iniciais, elaboradas em conjunto por aluno e professor, foi utilizada para estruturar as atividades em sala de aulas. Essas atividades incluíram experiências, aulas expositivas, leitura de livros didáticos e textos de divulgação científica. Tomando a pergunta “o que é luz?” como tema central de uma das aulas, os autores apresentaram um seminário baseado em textos de divulgação científica e discutiram a dualidade onda-partícula. Os autores analisaram o grau de participação dos alunos e o nível das perguntas realizadas no início e no final do curso. Os resultados mostraram-se satisfatórios.

Johansson *et al.* (2001) realizaram na Universidade de Estocolmo dois cursos voltados para estudantes de ensino médio: um sobre astronomia e outro sobre física de partículas. Os autores fazem parte de um projeto educacional, *Hands on CERN*, no qual colisões do tipo pósitron-elétron podem ser estudadas no acelerador LEP. Após a descrição do programa de ambos os cursos, os autores apresentaram uma atividade em que os estudantes utilizaram os dados do detector DELPHI, disponível na *internet*, para reconstruir os rastros criados durante as colisões de partículas. Os alunos analisaram 100 eventos onde a partícula  $Z^0$  decaía em léptons ou em quarks. Segundo os autores, além de se familiarizar com o método científico, os alunos tiveram a chance aprender sobre os “blocos construtores básicos” da natureza.

Num estudo de caso na Alemanha, Budde *et al.* (2002 b) acompanharam o processo de aprendizagem de dois estudantes expostos ao modelo atômico alternativo ‘*Electronium*’. Segundo esse modelo, o elétron é constituído de uma substância distribuída ao redor do núcleo cuja densidade é descrita pela equação de Schrödinger. Os resultados do pós-teste e a análise de uma entrevista realizada dois anos após a intervenção com o modelo *Electronium* mostraram que os estudantes desenvolveram a concepção atômica na qual os elétrons não se movem quando o átomo está em um estado estacionário.

Em um estudo com futuros professores, Kalkanis *et al.* (2002) elaboraram e avaliaram uma estratégia educacional que permitiu formar uma estrutura conceitual que inclui a física clássica (FC) e a MQ como dois sistemas conceituais totalmente independentes. A estratégia constituiu-se de cinco componentes: (a) investigação preliminar do conhecimento prévio dos estudantes; (b) associação da teoria com a fonte de concepções alternativas; (c) implementação de uma ferramenta instrucional; (d) avaliação dos processos de meta-cognição. De acordo com os autores, os resultados mostraram-se satisfatórios.

Paulo e Moreira (2004) implementaram uma unidade didática sobre MQ em turmas de primeiro e segundo anos do ensino médio em duas escolas da rede pública de ensino. As turmas de primeiro ano tiveram aulas sobre óptica ondulatória e sobre o experimento de dupla fenda antes da implementação da unidade didática. Os autores afirmam que os resultados da investigação parecem indicar que não houve dificuldades de aprender conceitos da teoria quântica que fossem maiores que as dificuldades de aprendizagem inerente à FC e que o conhecimento prévio sobre ondulatória clássica, por parte dos alunos, não parece influenciar criticamente os resultados de aprendizagem.

Ao trabalharem em colaboração com seis alunos da licenciatura do curso de física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ostermann e Moreira (2004) implementaram uma unidade didática sobre supercondutividade em turmas de duas escolas de ensino médio através da disciplina de Estágio Supervisionado. Os autores buscaram estabelecer analogias com a física FC à luz da teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. Os resultados da pesquisa mostraram-se satisfatórios tanto na preparação dos futuros professores, bem como em termos de aprendizagem dos alunos de nível médio.

Pérez e Solbes (2006) apresentam e avaliam uma proposta didática alternativa para o

ensino de Relatividade Especial (RE) no ensino médio. Com base em contribuição de Solbes, de Sánchez Ron, de Gil e Solbes e de Pérez e Solbes (*apud* PÉREZ e SOLBES, 2006), os autores desenvolveram uma estratégia que apresenta a crise na FC, constrói os fundamentos da RE e discute as linhas mais importantes da teoria, reafirmando os princípios de conservação. Para avaliar a proposta, os autores realizaram entrevistas e aplicaram um questionário conceitual sobre o tema em questão em 161 alunos. Os resultados mostraram uma diferença significativa entre os grupos experimental e controle, com um nível de confiança de 99%. A estratégia proporcionou uma melhora substancial na compreensão dos estudantes a respeito dos conceitos de espaço e tempo, além de uma melhora na compreensão da equivalência massa-energia e o papel dos princípios de conservação nos fenômenos energéticos.

#### *Mudanças no ensino de FMC em nível superior*

Santiago *et al.* (2001) elaboraram e avaliaram um curso introdutório de física de plasma para nível universitário. A metodologia adotada baseou-se em aulas expositivas e atividades experimentais, ministradas por quatro professores. Os temas abordados foram: (a) caracterização e produção de plasma; (b) funções de distribuição de energia; (c) parâmetros de plasma; (d) descarga gasosa em gases; (e) lei de Child-Langmuir; (f) lei de Paschen; (g) teoria de órbita; (h) magnetohidrodinâmica (MHD); (i) ondas de plasma; (j) descrição cinética de plasma e modelo híbrido de plasma limitado. Os resultados da avaliação do curso mostraram-se satisfatórios.

Anjos *et al.* (2001) desenvolveram um programa de ensino sobre radiação ionizante. Esse programa, desenvolvido para graduandos em física e professores de ensino médio, tem como foco as conseqüências ambientais do acidente radiológico de Goiânia. Após descrever o programa de ensino, os autores apresentaram os resultados da aplicação da parte experimental do curso, na qual incluiu a análise de amostras coletadas em uma das áreas afetadas pelo acidente. Os resultados do programa mostraram-se satisfatórios, principalmente com relação à motivação dos estudantes.

Scherr *et al.* (2002) apresentaram e avaliaram uma experiência didática desenvolvida com a finalidade de ajudar os estudantes a construir um entendimento significativo sobre a relatividade da simultaneidade. Com base em um levantamento prévio sobre as dificuldades dos estudantes acerca do tema em questão, os autores desenvolveram duas seções de tutoria (*Eventos e sistemas de referência* e *Simultaneidade*) em que os estudantes foram submetidos a uma estratégia didática constituída de três passos: primeiro, os alunos eram apresentados a uma situação que os induzia a um erro específico; a seguir, os alunos eram levados ao reconhecimento da discrepância entre suas idéias e o comportamento real do sistema físico; finalmente, os alunos eram guiados até o raciocínio necessário para resolver todas as inconsistências. De acordo com a avaliação dos autores, as seções de tutorias e o material instrucional utilizado ajudaram os alunos a melhorar significativamente suas habilidades de reconhecer e resolver alguns dos paradoxos clássicos de relatividade especial.

Greca *et al.* (2001) desenvolveram e avaliaram uma unidade didática organizada para introduzir a MQ a estudantes de graduação. A proposta, fundamentada na teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird, deu ênfase aos conceitos de superposição de estados, princípio da incerteza, probabilidade e medição. Rompendo com a abordagem semiclássica centrada na seqüência histórica, os autores desenvolveram os conteúdos numa seqüência em forma de espiral. Os resultados do teste de agrupamentos hierárquicos, além de outras técnicas de análise, mostraram que a abordagem fenomenológico-conceitual foi bem sucedida. Como parte do mesmo estudo, Greca e Herscovitz (2002) implementaram em três turmas de engenharia a mesma unidade didática introdutória com um enfoque fenomenológico-conceitual. Enfatizando as características quânticas dos sistemas, as autoras abordaram os seguintes temas: (a) computação quântica; (b) efeito túnel; (c) auto-interferência de uma partícula; (d) saltos quânticos; e (d) o paradoxo do gato de Schrödinger. Os resultados da implementação desta estratégia didática mostraram que mais da

metade dos estudantes conseguiram uma compreensão razoável dos conceitos discutidos. Em outro artigo, Greca e Herscovitz (2005) deram ênfase ao princípio da superposição de estados, tema pouco abordado nos cursos introdutórios de MQ tradicionais. Os resultados apresentados mostram que, apesar de manterem algumas concepções errôneas, os estudantes tiveram uma melhor compreensão da teoria quando comparados a outros que receberam instrução numa abordagem tradicional e a estudantes de física de semestres mais avançados que foram submetidos aos mesmos testes.

Em outro estudo, Greca e Freire Jr. (2003) implementaram, em três grupos de estudantes de engenharia, a unidade didática com enfoque conceitual-fenomenológico. A estratégia didática destacou as características dos sistemas quânticos (superposição de estados, princípio da incerteza, distribuição de probabilidades e não-localidade) ao invés de buscar por analogias clássicas. Essa abordagem permitiu que os autores apresentassem a teoria associada a uma ortodoxa, mas realista, interpretação do conceito de estado quântico, considerado o conceito-chave da teoria quântica, representando a realidade física de um sistema independentemente dos processos de medição. Os resultados mostraram que mais da metade dos estudantes atingiu um entendimento razoável com relação às bases da teoria quântica para esse nível de instrução.

#### *Uso de tecnologias de informação e comunicação*

Müller e Wiesner (2002) implementaram, através do estudo de interferometria quântica no experimento de dupla fenda e no interferômetro de Mach-Zehnder, um curso introdutório de MQ no contexto dos laboratórios virtuais. O objetivo era mostrar aos estudantes desde o início como os fenômenos quânticos diferem da nossa experiência clássica diária. Segundo os autores, os resultados da avaliação do curso mostraram que a maioria dos estudantes adquiriu concepções apropriadas da MQ e que muitas das concepções alternativas comumente encontradas nas instruções tradicionais foram evitadas.

Ao trabalharem com professores de física do ensino médio, Ostermann e Ricci (2004) implementaram uma unidade didática conceitual sobre MQ elaborada com base nos trabalhos de Müller e Wiesner, de Pessoa Jr. e de Ireson (*apud* OSTERMANN e RICCI, 2004 a). Os autores utilizaram a óptica ondulatória como “porta de entrada” para o mundo quântico e destacaram os experimentos de interferência quântica a partir de dois experimentos virtuais. Os resultados de um pré e pós-testes indicaram mudanças nas concepções dos professores. Em outros artigos (OSTERMANN, RICCI 2005), os autores apresentaram os resultados de um estudo envolvendo uma nova versão da unidade didática, com maior ênfase nos experimentos virtuais. Além dos roteiros exploratórios elaborados para as atividades com os *softwares*, foram utilizados como material de apoio o livro “Alice no país do quantum” de Gilmore e um texto de apoio produzido pelos autores. Os resultados mostraram uma melhora na compreensão dos professores, principalmente com relação às diferenças entre os objetos clássicos e quânticos.

Trindade *et al.* (2005) estudaram o efeito de um simulador virtual 3-D na visualização e compreensão de alunos sobre os orbitais do átomo de hidrogênio. Os autores submeteram estudantes do primeiro ano dos cursos de Ciências da Universidade de Coimbra, Portugal, a uma entrevista guiada, na qual eles eram solicitados a responder as perguntas antes e depois da visualização gerada pelo *software*. A comparação das respostas dos estudantes mostrou que os elétrons eram inicialmente concebidos de acordo com o modelo planetário, movendo ao redor do núcleo em uma órbita bem determinada. Após o uso do *software*, os estudantes reconheceram que os elétrons não se movem em nenhum sentido clássico.

Machado e Nardi (2006) avaliaram em um curso de extensão para alunos do terceiro ano do ensino médio um *software* educacional sobre temas de FMC. Trata-se de um hipertexto

elaborado numa perspectiva ausubeliana que busca desenvolver os seguintes conceitos: (a) a equivalência entre massa e energia; (b) o caráter descontínuo da evolução do conhecimento e sua provisoriade; (c) relações entre ciência, tecnologia, sociedade e ambiente; (d) o papel da ética na ciência. O *software* é constituído de seis módulos didáticos: visão geral (textos introdutórios sobre FC e FMC); a teoria da RE (postulados, dilatação do tempo e contração do espaço, momentum e energia relativística, teoria da relatividade geral (RG)); tecnologia & sociedade (textos sobre física nuclear, reatores e armas nucleares, acidentes radioativos); história da ciência (textos sobre o desenvolvimento histórico das teorias modernas, projeto Manhattan e bibliografia de A. Einstein); filosofia & ciência (metodologia dos programas de pesquisa, ciência e ética); fronteiras da ciência (textos sobre buracos negros e ondas gravitacionais). Os resultados da avaliação mostraram que o uso do computador foi fator de motivação, a variedade de recursos de mídia favoreceu a visualização e a interpretação dos fenômenos abordados e a estruturação do hipertexto com base em princípios ausubelianos foi um elemento facilitador da aprendizagem.

Explorando a eficácia do uso da escrita como ferramenta de aprendizagem no ensino de ciências, Gunel *et al.* (2006) compararam o entendimento de estudantes sobre MQ ao incorporar representações multimodas em dois diferentes formatos de escrita: formato de apresentação (PowerPoint) e formato de resumo. Os autores utilizaram um pré e um pós-teste para comparar o desempenho de dois grupos através de duas unidades. Os conteúdos abordados foram: o efeito fotoelétrico e o modelo atômico de Bohr. Os resultados mostram que, em ambas as unidades, o grupo que utilizou o formato de apresentação teve uma pontuação significativamente melhor do que o grupo rival.

#### *Abordagem ciência, tecnologia e sociedade*

Carstens-Wickham (2001) desenvolveu um curso interdisciplinar que possibilitou a integração de dois campos distintos: ciências naturais e ciências sociais. O curso, intitulado “a era atômica”, examina a inter-relação entre eventos culturais, sociais, históricos e políticos e o desenvolvimento da física na Europa e nos Estados Unidos na primeira metade do século XX. O autor desenvolveu os temas (refugiados europeus, ciência americana e bomba atômica) a partir de uma combinação única de física, sociologia e língua alemã. As atividades didáticas consistiram em leituras acompanhadas de apresentações no *PowerPoint*, vídeo clipes, filmes, slides, materiais de áudio e alguns trabalhos de grupo. Os resultados da avaliação do curso realizado pelos estudantes mostraram-se satisfatórios.

Samagaia e Peduzzi (2004), preocupados em manter o estudante como centro das atividades em sala de aulas, implementaram numa turma de 8º série do ensino fundamental um módulo didático sobre FMC no contexto do Projeto Manhattan (1945-1945). Os autores utilizaram, como estratégia didática, uma técnica psicoterápica RPG (*Roleplaying Game*) e estruturaram uma história (supostamente fictícia) que reproduziu o quadro da 2ª Guerra Mundial. Os conteúdos contemplados ao longo da unidade didática foram: fissão nuclear; a radiação; a pesquisa e o uso de armas químicas e biológicas; a energia. Os resultados da pesquisa mostram uma grande receptividade da proposta por parte dos estudantes, além de evidências de aprendizagem dos conteúdos envolvidos.

Kofoed (2006) também apresentou um exemplo de jogos de papéis (*Roleplaying Game*) baseado num projeto educacional envolvendo o desenvolvimento e o uso das bombas de Hiroshima e Nagasaki durante a segunda guerra mundial. Fundamentado nos trabalhos de Gräber *et al.* (*apud* KOFOED, 2006), o projeto educacional *Dramatic Science Play* foi desenvolvido para escolas de ensino médio da Dinamarca. Após a implementação do programa em 12 turmas, o autor submeteu seus alunos a um questionário semi-aberto constituído de 56 questões. Os temas avaliados foram o jogo de papéis nas aulas de física; o interesse dos alunos em física e a ética na física, e os resultados

mostram-se satisfatórios.

### *Articulação com a história e a filosofia das ciências*

Peduzzi (2004), ao trabalhar com alunos universitários, utilizou um material instrucional produzido a partir de notas de aula, à luz de referenciais epistemológicos. A proposta foi de aproximar a física da filosofia a partir das raízes históricas da física atômica na disciplina Estrutura da Matéria. Após uma sondagem exploratória, os alunos demonstraram bastante receptividade com o material. Os principais aspectos analisados foram: (a) a importância do papel do professor como facilitador da compreensão do texto; (b) as dificuldades inerentes aos conteúdos estudados; e (c) a falta de clareza de conteúdos específicos.

Peduzzi e Basso (2005) desenvolveram e avaliaram um texto didático sobre o átomo de Bohr fundamentado na epistemologia de Lakatos. Dirigido para professores do ensino médio, o texto apresenta o tema de modo articulado ao seu contexto histórico, oferecendo uma alternativa não-empirista para fundamentar as discussões em sala de aula. O material foi submetido a uma avaliação realizada por uma amostra de professores de física que atuam no ensino médio. De acordo com os autores, a insuficiência da concepção empírico-indutivista para a abordagem do átomo de Bohr, presente nos livros didáticos, foi amplamente compreendida e ressaltada pelos professores.

Köhnlein e Peduzzi (2005) implementaram em uma turma de ensino médio um módulo didático baseado em uma abordagem histórico-filosófica da relatividade restrita. A proposta foi organizada de acordo com os três momentos pedagógicos de Angotti e Delizoicov. A problematização inicial consistiu do levantamento de concepções dos alunos acerca dos métodos de construção do conhecimento científico. A organização do conhecimento se fundamentou a partir das discussões sobre a concepção empirista-indutivista e suas limitações. Finalmente, a aplicação do conhecimento teve como pano de fundo a mecânica clássica (transformações de Galileo), o eletromagnetismo (éter e as transformações de Lorentz) e a relativística restrita, abordados numa perspectiva de ruptura entre paradigmas. Os resultados do trabalho mostraram mudanças significativas nas concepções de ciência vigentes.

### ***Levantamento de concepções***

Os trabalhos classificados nessa categoria apresentam resultados da avaliação de professores e alunos acerca de temas específicos de FMC. Essas avaliações buscam levantar dificuldades, atitudes, concepções prévias, modelos mentais, invariantes operatórios, modos de raciocínio, perfis conceituais, interpretações, entre outros.

Singh (2001) investigaram as dificuldades de estudantes de um curso avançado de MQ sobre os conceitos de medição quântica e evolução temporal. Os autores aplicaram um teste a 89 estudantes de seis diferentes universidades e realizaram entrevistas com outros 9 estudantes. Os resultados da pesquisa mostraram que as dificuldades demonstradas pelos estudantes independem da universidade frequentada, do estilo de instrução ou do livro-texto adotado. Os resultados também sugerem que as concepções errôneas dos estudantes derivam da tendência em generalizar, além da falta de habilidade em discriminar conceitos relacionados.

Wittmann et al. (2002) investigaram os modelos utilizados por estudantes de engenharia elétrica ao raciocinar sobre condutividade elétrica. Com base na técnica de entrevista desenvolvida por Piaget, os autores questionaram os estudantes sobre o comportamento de diversos materiais ao conectá-los nos terminais de uma bateria, inclusive quando submetidos a uma variação de temperatura. Os resultados mostraram que, ao invés de raciocinar em termos de elétrons livres, a maioria dos alunos recorreu a seus modelos de átomos individuais para explicar a origem dos

elétrons. Os principais modelos usados pelos alunos são: a) o campo elétrico atua no átomo individual de modo a arrancar o elétron da última camada para formar a corrente elétrica; b) elétrons que escapam de seus átomos são absorvidos por outros átomos. Tais modelos levaram os estudantes a previsões errôneas como o aumento de temperatura implica aumento na corrente elétrica devido a maior energia transferida aos elétrons.

Cataloglu e Robinett (2002) desenvolveram e testaram um instrumento de avaliação projetado para testar o entendimento visual e conceitual de estudantes acerca de algumas idéias centrais da MQ. O instrumento é constituído de 25 questões de múltipla escolha, todas envolvendo visualização gráfica, com espaço para comentários e justificativa das respostas, além de uma escala para o estudante informar o grau de confiança das mesmas. Para medir o desenvolvimento da compreensão dos alunos ao longo de suas carreiras acadêmicas, os autores aplicaram o teste em cerca de 160 estudantes de todos os níveis, durante um período de três semestres. Os resultados mostraram diferenças claras no entendimento entre os estudantes de graduação e pós-graduação.

Yang (2003) analisou os modos de raciocínio utilizado pelos estudantes do último ano do ensino médio de Taiwan quando se posicionam em relação ao uso de energia nuclear. A análise estatística e as entrevistas realizadas pelos autores mostraram que o desempenho dos estudantes em ciências é um bom prognóstico de suas preferências com relação aos conhecimentos científicos e sociais, isto é, que os modos de raciocínio utilizados pelos estudantes são consistentes com as disciplinas de sua preferência. Os resultados da pesquisa também mostraram que os estudantes sem preferência (neutros) dispunham de um modo de raciocínio mais integrador quando comparado com os demais.

Num estudo envolvendo dois grupos de indivíduos recém saídos da escola (30 pessoas entre 18 e 24 anos de idade), Alsop (2001) procurou investigar as atitudes das pessoas que viveram e se educaram em regiões geográficas com nível de concentração de rádio na atmosfera maior do que a média. Utilizando a metodologia de entrevista-sobre-cenários, o autor abordou os seguintes temas: (a) a natureza e os efeitos gerais das fontes radioativas e radiação; (b) a natureza específica e feitos do gás rádio; e (c) os perigos associados com radioatividade e com o gás rádio. Os resultados da pesquisa mostraram que, embora poucas diferenças conceituais e emocionais foram observadas entre os grupos, os participantes que viveram com níveis de concentração de rádio elevados demonstraram maior conhecimento sobre as práticas diárias de viver sob crescente risco.

Em uma discussão sobre o uso de analogias no ensino de ciências, Taber (2001) alertou para dificuldades potenciais de se modelar o átomo no sistema solar. O autor defende que as diferenças entre os dois sistemas são tão importantes quanto as suas semelhanças. Com base nos trabalhos de Taber, de Gilbert e Zylbersztajn e de Watts e Zylbersztajn (*apud* TABER, 2001), o autor chamou a atenção para concepções errôneas de alguns alunos acerca das leis de Newton quando expressam suas idéias sobre forças de interação entre as cargas no átomo e sobre as forças gravitacionais entre o Sol e os planetas. Alguns resultados sugerem que os alunos têm lançado mão de modelos atômicos para fazer inferências a respeito do sistema solar.

Scherr *et al.* (2001) investigaram a concepção de estudantes acerca do conceito de tempo na RE. Os resultados da aplicação de um teste contendo três questões conceituais sobre simultaneidade mostraram que estudantes de todos os níveis acadêmicos têm sérios problemas com a relatividade da simultaneidade e com o papel do observador em um sistema de referência inercial. Segundo os autores, há evidências que sugerem que os estudantes constroem estruturas conceituais nas quais a simultaneidade absoluta e a simultaneidade relativa coexistam harmoniosamente. Os autores destacaram as seguintes concepções dos estudantes: (a) a crença de que dois eventos são simultâneos se o observador recebe os sinais de ambos os eventos ao mesmo tempo; (b) a crença de que a simultaneidade é absoluta; (c) a crença de que cada observador constitui um sistema de

referência distinto.

Greca e Herscovitz (2002) analisaram, à luz da teoria de Johnson-Laird, os modelos mentais utilizados pelos 69 alunos de uma turma de graduação durante a resolução de três problemas abertos envolvendo alguns conceitos fundamentais da teoria quântica (princípio da incerteza, densidade de probabilidade e superposição linear de estados). Apesar de 17 estudantes mostrarem evidência da construção de modelos adequados para abordagem de problemas de MQ, a maioria baseou-se nos modelos mentais clássicos ou “híbridos” para descrever o comportamento quântico dos sistemas microscópicos. Os detalhes desse trabalho já foram descritos na seção anterior.

Montenegro e Pessoa Jr. (2002) investigaram as interpretações “privadas” que alunos de MQ desenvolveram sobre essa teoria. O instrumento utilizado pelos autores foi aplicado em cinco turmas de graduação e em três turmas de pós-graduação e constitui-se de questões abertas e fechadas sobre: (a) o experimento de dupla fenda; (b) princípio da incerteza; estado quântico; retrodição; e postulado da projeção. Os resultados mostraram, entre outros aspectos, que as interpretações adotadas pelos alunos acerca da teoria quântica mudam conforme a situação-problema apresentada.

Olsen (2002) examinou como estudantes pré-universitários (18-19 anos de idade) da Noruega lidam com o conceito de dualidade onda-partícula. Os resultados de um teste (duas questões objetivas e uma questão aberta) aplicado a 236 estudantes recém formados em nível médio mostraram que, para a maioria dos indivíduos da amostra, elétrons são partículas enquanto que a luz apresenta natureza dual. As concepções mais frequentes, segundo esse estudo, foram: (a) elétrons são partículas (27,9%); (b) elétrons são partículas, mas possuem algumas propriedades ondulatórias (22,0%); (c) luz são partículas que se movem em ondas (8,1%); (d) luz são ondas (6,7%); (e) elétrons são partículas que se movem em ondas (6,4%). Segundo o autor, 59,2% dos estudantes formulou uma dualidade muito vaga para luz (17,2% para elétrons).

Pérez e Solbes (2003) fizeram uma análise crítica acerca da possibilidade de inserção de temas de RE no ensino médio. A investigação constitui-se de três etapas: (a) análise dos livros didáticos de nível médio; (b) análise das respostas de um questionário aplicado a professores de ensino médio acerca de suas atitudes e de suas propostas de abordagem sobre o tema; e (c) análise das respostas de um questionário aplicado a alunos de nível médio acerca de suas concepções sobre conceitos clássicos relacionados à teoria da RE. Segundo os autores, os livros de nível médio não apresentam adequadamente os conceitos de tempo e de espaço. Os resultados da pesquisa também mostraram que os professores não levam em conta resultados da investigação didática e que pouco se consolidam as novas concepções nos estudantes.

Após a implementação de uma unidade sobre MQ segundo a interpretação de Copenhagen, Paulo e Moreira (2004), num estudo envolvendo cerca de 100 alunos de ensino médio, levantaram algumas concepções referentes aos conceitos de complementaridade e não-determinismo a partir de um pós-teste sobre o experimento imaginário do gato de Schrödinger. As categorias identificadas nesse estudo foram: soma das partes diferentes do todo (auto-interferência de aspectos antagônicos); superposição de estados (coexistência harmônica de opostos); interação sujeito-objeto (características dependentes do contexto); colapso da função de onda (a medida prepara o estado); incompreensibilidade (dificuldade inerente à teoria); separação do mundo clássico e quântico (limite de validade da teoria); clássico/ probabilístico (coexistência de probabilidades e não de estados); clássico/ livre-arbítrio (probabilidades determinadas pelas escolhas); clássico/ ignorância (incerteza relacionada à ignorância). Outros detalhes desse trabalho já foram apresentados na seção anterior.

Num trabalho realizado com uma turma do curso de mestrado profissional, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Ostermann e Ricci (2004) levantaram algumas concepções dos professores de física de ensino médio acerca da natureza dos objetos quânticos. Para a maioria dos professores da amostra (dezoito no total): falta clareza sobre os limites de validade da MQ e da FC; massa é uma propriedade exclusiva da FC; as leis de conservação de massa e momentum só se aplicam aos objetos clássicos; os objetos quânticos são necessariamente relativísticos; os objetos quânticos possuem necessariamente propriedades físicas discretas; a impossibilidade de se observar diretamente os objetos quânticos está associada à sua natureza probabilística; os fótons só existem nas transições atômicas. O restante do trabalho já foi apresentado na seção anterior.

Através de uma entrevista com professores de física de ensino médio na Argentina, Arriasecq e Greca (2004) fizeram um levantamento das principais dificuldades que os docentes enfrentam ao ensinar a RE. O objetivo central da pesquisa foi investigar quais são os livros didáticos mais utilizados pelos professores na preparação de suas aulas, assim como os mais recomendados aos alunos. A análise da entrevista aponta para a falta de conhecimento prévio, por parte dos estudantes, acerca de alguns conceitos fundamentais de mecânica newtoniana tais como transformações de Galileu (41%) e sistema de referência (27%) como sendo o principal obstáculo para ensino da RE, segundo a avaliação dos professores. A pesquisa revelou também que a maioria dos docentes utiliza os livros didáticos como principal, se não único, recurso na preparação das aulas e que, em geral, esses mesmos livros são recomendados aos alunos. Em um outro estudo realizado na Argentina, Arriasecq e Greca (2006) levantaram algumas concepções que estudantes de nível médio possuem acerca de conceitos fundamentais da física clássica considerados necessários para uma adequada conceitualização dos aspectos mais relevantes da RE. Dentre os aspectos mais importantes investigados pelas autoras, destacam-se: (a) a simultaneidade; (b) sincronismo de relógios; (c) tempo; (d) espaço; (e) observador; (f) sistema de referência. A análise dos dados obtidos nesse estudo foi feita com base na teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud e os resultados mostraram evidência de alguns teoremas-em-ação, tais como: o tempo é difícil de definir; o tempo é uma unidade; o tempo é absoluto; o tempo é relativo; representa-se o tempo com um relógio; o tempo é uma variável independente de um sistema de coordenadas; o tempo não se pode representar; não se pode viajar no tempo por questões tecnológicas; não é possível viajar no tempo fisicamente; o espaço não se pode representar; observador pode ser um indivíduo ou um instrumento que registra dados detalhadamente; dois eventos são simultâneos quando ocorrem ao mesmo tempo e no mesmo lugar; o mais importante no processo de medição é o instrumento; para resolver problemas de física não é necessário levar em conta o sistema de referência; os postulados são crenças que podem se converter em teorias científicas; as teorias científicas permitem explicar fenômenos.

Taber (2005) utilizou a Tipologia como um instrumento heurístico para diagnosticar as origens das dificuldades de estudantes (16-18 anos de idade) em aprender um tópico curricular problemático: o modelo orbital do átomo. Segundo o autor: (a) o desconhecimento sobre FC que prediz que átomos com elétrons “planetários” podem não ser estáveis pode impedir os estudantes de compreender porque a quantização de energia é introduzida; (b) estudantes que não sabem que a força centrípeta é necessária para manter uma órbita circular acabam esperando que os elétrons sejam atraídos para dentro do núcleo, mesmo no modelo planetário do átomo; (c) estudantes que não entendem a natureza do movimento circular vêem a inércia como razão suficiente para elétrons orbitarem em torno dos átomos; (d) estudantes que adotam o significado cotidiano de *spin* imaginam que os elétrons possuem essa propriedade por estarem continuamente girando; (e) os estudantes esperam que a energia absorvida da radiação seja distribuída pelos elétrons assim com o calor é distribuído pelas moléculas do material aquecido.

Ke *et al.* (2005) investigaram a evolução dos modelos mentais de estudantes sobre a

estrutura atômica. Através de um questionário do tipo papel e lápis e de entrevistas envolvendo temas de MQ, os autores compararam os modelos de estudantes de diferentes níveis de instrução (graduandos, mestrandos e doutorandos) com os três estágios do desenvolvimento histórico da mecânica quântica (velha mecânica quântica, transição para mecânica ondulatória e mecânica ondulatória probabilística). Os resultados mostraram que uma porção substancial dos entrevistados (17 dos 28 estudantes) encaixa-se em mais de uma categoria.

Baseados na noção de perfil conceitual de Mortimer, Karam *et al.* (2006) implementaram em uma turma de primeiro ano do ensino médio uma unidade didática que aborda tópicos da RE logo após o estudo da cinemática. Os resultados do pré e pós-teste evidenciaram uma ampliação do perfil conceitual do tempo por partes dos estudantes. As concepções de tempo identificadas pelos autores, ao final da unidade, foram: tempo psicológico (realidade subjetiva); tempo cronológico (unidades quantificadas: relógio); tempo absoluto de Newton (independente de referencial); tempo discreto (quadros indivisíveis); tempo determinístico (destino); tempo e probabilidade (futuro incerto); tempo relativístico.

Rego e Peralta (2006) investigaram as concepções de estudantes portugueses de diferentes níveis de instrução acerca do conceito de radiação. Os autores aplicaram um instrumento de análise em uma amostra de 1246 estudantes. O instrumento constitui-se de duas partes: questões de múltipla escolha; uma escala do tipo Likert. Esse instrumento possibilitou a avaliação do conhecimento da amostra sobre os diferentes tipos de radiações, fontes radioativas e os efeitos da radiação sobre os seres vivos. Os resultados mostraram que, apesar da maioria dos elementos da amostra já ter ouvido falar sobre radiação, uma porcentagem significativa não tem conhecimento sobre os processos naturais de radiação, nem das diferenças entre os distintos tipos de radiação (ionizada e não-ionizada). Os autores afirmaram que, embora muitos estudantes reconheçam os raios-X como sendo um tipo de radiação, o mesmo não ocorre para a luz.

### ***Bibliografias de consulta para professores***

Nos trabalhos classificados nessa categoria, foi possível identificar quatro diferentes tipos de produção acadêmica: 1) textos didáticos; 2) novos recursos didáticos; 3) novas propostas e estratégias didáticas; 4) divulgação científica.

#### *Textos didáticos*

Linton (2001) demonstrou que a equação para o efeito Doppler relativístico pode ser obtida a partir de uma abordagem corpuscular para o fóton. Utilizando as transformadas de Lorentz, o autor deduziu a velocidade  $v$  de uma partícula clássica e aplicou a relação entre o momentum e o comprimento de onda de De Broglie. Para o limite  $v \rightarrow c$ , o autor obteve a mesma equação para o efeito Doppler obtida para luz na abordagem ondulatória.

Dunne (2001) chamou a atenção para as regras de construção dos diagramas de Feynman. Segundo o autor, apesar de se tratar de um poderoso instrumento para representar e descrever as interações entre partículas subatômicas, um grande número de textos didáticos, bem como instruções de professores referentes à física de partículas, não abordam a construção e o uso desses diagramas de forma consistente, apresentando-os como uma mera ilustração informal. Após uma discussão sobre o modelo padrão, interações e as partículas de troca, o autor apresentou uma convenção para a construção e interpretação dos diagramas, discutindo alguns exemplos de aplicação.

Dunne (2002) apresentou as origens do modelo de troca de píons para as forças nucleares. Ao longo dessa discussão, o autor descreveu os processos de interação via de troca de partículas

mediadoras e se opõe à analogia da bola de basquete, reinterpretando as interações entre partículas à luz do modelo dos quark-glúon para a estrutura dos núcleons.

Jones (2002) propôs uma maneira simples e prática de introduzir alguns conceitos de MQ tais como dualidade onda-partícula, a versão tempo-energia do princípio de incerteza de Heisenberg, partículas virtuais e o papel que elas desempenham na interação entre partículas subatômicas. Esse trabalho se baseou em experiências docentes passadas em que o autor abordou esses tópicos em nível introdutório para audiências variadas. Após varias tentativas, essa abordagem se mostrou mais bem sucedida por enfatizar que medir a frequência de uma onda com melhor precisão, mais tempo é necessário.

Como parte de um projeto pedagógico desenhado para construir cinco experimentos que utilizam fótons correlacionados para demonstrar efeitos quânticos, Holbrow *et al.* (2002) propuseram mudanças no programa de estudos de MQ que incluam uma discussão sobre o uso de divisores de feixe. Após apresentar uma discussão focada em três experimentos moldados no interferômetro de Mach-Zehnder, os autores demonstraram como usar a álgebra linear para descrever as operações com os divisores de feixe.

Levrini (2002) apresentou uma análise das diferentes abordagens filosóficas da teoria da RG. Com base em critérios culturais e educacionais, a autora utilizou o conceito de espaço para reconstruir o debate sobre os fundamentos da teoria, identificando três interpretações possíveis para seu formalismo. A idéia geral é que esse debate pode servir de guia para professores universitários que desejam prover seus alunos com ferramentas para a leitura e a interpretação de diferentes livros acadêmicos sobre o tema. De acordo com a autora, esses livros-texto atribuem diferentes papéis à geometria e adotando diferentes critérios para definir o que é “real”.

No intuito de esclarecer e simplificar o ensino da MQ, Lévy-Leblond (2003) apresentou uma discussão conceitual sobre as entidades básicas da teoria quântica. Com base na noção de “quantons”, proposta por Mario Bunge, o autor formulou sua descrição dos objetos quânticos em termos de duas dicotomias do tipo discreto/contínuo; uma com relação ao número de objetos e outra com respeito à extensão de suas propriedades no espaço-tempo. De acordo com o autor, os quantons são discretos com relação ao primeiro aspecto e contínuos em relação ao segundo; diferentemente dos objetos clássicos que são discretos em ambos os aspectos (partículas clássicas) ou contínuo em ambos os aspectos (campos clássicos). O autor também discutiu sobre outras propriedades quânticas como a não-localidade e o princípio da exclusão de Pauli.

Mermin (2003) apresentou uma estratégia didática elaborada para ensinar MQ a estudantes matematicamente instruídos, mas sem formação em física. A proposta, destinada aos matemáticos e cientistas da computação, é abordar apenas o suficiente para que os estudantes possam compreender e desenvolver algoritmos em computação quântica e teoria quântica da informação. Os tópicos sugeridos pelo autor são: (a) bits clássicos (Cbits) e operadores sobre os Cbits; (b) bits quânticos (Qbits) e operadores sobre os Qbits; (c) medição.

Black e Gutenkunst (2003) apresentaram uma introdução ao tema “ondas gravitacionais”. Preocupados com o ensino desse novo tema em nível de graduação e pós-graduação, os autores discutem o funcionamento de interferômetros de ondas gravitacionais (detectores). Os autores abordam os seguintes tópicos: (a) ondas gravitacionais; (b) interferômetro de Michelson como detector de ondas gravitacionais; (c) transformando um detector de Michelson em um detector de ondas gravitacionais.

Valadares e Moreira (2004)<sup>4</sup> apresentaram um texto didático abordando analogias e sugestões conceituais e práticas para se introduzir tópicos de FMC no ensino médio. O texto abrange: efeito fotoelétrico; Laser e aplicações – fibras ópticas e leitura de código de barras; Radiação do corpo negro – experiência de absorção e emissão de radiação.

Hobson (2005) propôs uma mudança conceitual na forma de abordar a MQ não-relativística nas disciplinas gerais de FQ dos cursos de graduação. O autor argumenta que a instrução tradicional trata a radiação como ondas eletromagnéticas quantizadas, enquanto que a matéria é entendida como sendo partículas acompanhadas de uma função de onda. Segundo o autor, a teoria quântica de campos, por ter uma visão mais unificadora, pode dispersar as concepções newtonianas dos alunos sobre a matéria, além de resolver o paradoxo onda-partícula.

A partir de experimentos de interferência luminosa, Ostermann e Prado (2005) apresentaram um texto sobre as quatro grandes escolas de interpretações da MQ, dando especial ênfase à interpretação dos universos paralelos de Everett. As autoras discutiram a interferência nos regimes clássico e quântico (experimento monofotônico) e apresentaram as interpretações de cada escola de pensamento, sendo elas: a interpretação ondulatória-realista; interpretação da complementaridade; a interpretação dualista-realista; a interpretação dos muitos mundos.

Ogborn e Taylor (2005) apresentaram as leis de Newton como uma consequência fundamental do modo como o mundo quântico funciona. Usando o princípio da menor ação de Feynman, os autores deduziram as leis do movimento da mecânica clássica. Alguns enunciados tais como “os fótons exploram todos os caminhos” foram discutidos.

Williams (2005) apresentou uma breve história da antimatéria. Após apresentar as descobertas das principais antipartículas, o autor sugeriu que o tema fosse introduzido a estudantes mais jovens. A sugestão é de ensinar a antimatéria na medida em que se introduz o modelo do átomo, através da introdução do anti-hidrogênio, comparando e contrastando pósitrons e antiprótons com prótons e elétrons.

Lovell (2005) utilizou argumentos simples de dinâmica e de geometria espacial para explicar os efeitos da RG aplicados ao campo gravitacional num espaço tridimensional comum. O autor apresentou os diferentes resultados obtidos por moradores de diferentes andares de um edifício muito alto quando o mesmo evento é observado. Efeitos como o desvio gravitacional para o vermelho, a dilatação do tempo e o espaço curvo foram discutidos.

Kenny (2006) apresentou uma derivação alternativa para a dilatação temporal na RE. Segundo o autor, a fórmula de Lorentz para a dilatação do tempo pode ser obtida a partir de um gráfico de posição versus tempo plotado para uma espaçonave se comunicando com a Terra. Além da dilatação temporal, o autor também discutiu o paradoxo dos gêmeos, a contração do comprimento e a experiência “vivida” pelo tripulante da nave.

Ostermann e Ferreira (2006) apresentaram uma introdução à supercondutividade. Preocupadas com a atualização do currículo de física de ensino médio, as autoras propuseram uma forma adequada de abordar esse tema mediante a discussão das principais propriedades dos supercondutores. As autoras discutiram os seguintes tópicos: condução eletrônica em metais – um modelo simples de metal, corrente elétrica, resistência elétrica, resistência elétrica dependente da temperatura; supercondutividade – resistência elétrica zero, efeito Meissner, transição de fase eletrônica, materiais supercondutores.

---

<sup>4</sup> Publicado no Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 8, n. 3, dez. 1991.

No intuito de promover um entendimento qualitativo acurado sobre as origens dos diagramas de Feynman como representação das interações entre partículas, Daniel (2006) apresentou uma introdução à teoria quântica de campos. Segundo o autor, a combinação de diagramas elementares para a construção de novos diagramas é a principal característica do modelo padrão. O artigo apresentou uma discussão sobre: campos quânticos; partículas; modelo padrão; diagramas de Feynman; interações eletromagnéticas; construção de diagramas a partir de processos elementares; hierarquia dos diagramas; interação fraca; e interação forte.

#### *Novos recursos didáticos*

Ostermann e Cavalcanti (2001) apresentaram um pôster sobre as interações fundamentais e as partículas elementares. Desenvolvido para facilitar a inserção desse tema no ensino médio, o pôster traz informação a respeito das quatro interações fundamentais da natureza (gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca), além das propriedades da matéria (cor, carga, massa), classificação das partículas elementares (quarks, léptons e partículas mediadoras) e combinações das mesmas (hádrons: bárions e mésons). O material didático descrito acima também apresenta o modelo atual do átomo, bem como alguns exemplos de leis de conservação como o decaimento beta e a aniquilação quark-antiquark.

Cavalcante *et al.* (2001) apresentaram duas atividades didáticas distintas envolvendo o ensino do efeito fotoelétrico: uma simulação computacional e um experimento prático com LED's (*Light Emitting Diode*). O objetivo é determinar experimentalmente um valor aproximado para a constante de Planck. Além de uma introdução conceitual e geral sobre a descoberta do efeito fotoelétrico, os autores propõem, ao final do texto, uma abordagem interdisciplinar entre professores de física, filosofia e matemática para discutir o comportamento dual da luz.

Cavalcante e Tavolaro (2001) desenvolveram uma oficina de FMC que visa sua inserção no ensino médio. Utilizando experimentos de baixo custo e simulações computacionais, as autoras apresentam ao longo da oficina uma revisão sobre óptica ondulatória e ondas eletromagnéticas, além de atividades envolvendo o efeito fotoelétrico, a observação de espectros contínuos e discretos e a difração de elétrons.

Para abordar “a descoberta do núcleo”, tema geralmente tratado apenas na disciplina de química, Cavalcante *et al.* (2001) apresentaram um recurso computacional e um equipamento desenvolvido por Ferreira *et al* (*apud* CAVALCANTE *et al.* 2001). O objetivo foi simular o experimento de Geiger-Marsden e obter o espalhamento de Rutherford, desenvolvendo no aluno a capacidade de investigação científica.

Dias *et al.* (2002) elaboraram um laboratório virtual de física nuclear. Esse software desenvolvido pelos autores simula um detector de radiação tipo Geiger-Müller, três amostras radioativas e placas absorvedoras. O programa está disponível para download no seguinte endereço eletrônico: [www.fisica.ufc.br/brindes.html](http://www.fisica.ufc.br/brindes.html).

Abd-El-Khalick (2002) propôs uma atividade para ajudar os estudantes de ensino médio a desenvolver uma melhor compreensão sobre a natureza da ciência a partir do ensino do experimento de Rutherford e da estrutura atômica. A atividade consiste em uma espécie de caixa preta, feita com cartolina, bombardeada com bolas de ping-pong cujas trajetórias são observadas num anteparo. Pretende-se, a partir do experimento, analisar alguns aspectos da ciência, tais como: (a) a natureza observacional e inferencial do conhecimento científico; (b) a distinção entre observação e inferência; (c) a natureza dos modelos científicos; (d) o papel da criatividade e da imaginação nos modelos científicos gerados.

Pascolini e Pietroni (2002) implementaram um projeto de ensino de física de partículas baseado nos diagramas de Feynman. Abrindo mão do formalismo matemático, os autores desenvolveram um brinquedo com três elementos: elétrons, fótons e partículas mediadoras (vértices de interação). As demonstrações para públicos de nível médio têm possibilitado discussões de alguns conceitos do mundo das partículas elementares, tais como antimatéria, leis de conservação, partículas de criação e destruição e partículas reais e virtuais.

Arruda e Toginho Filho (2004) desenvolveram um laboratório caseiro de física moderna utilizando materiais de baixo custo. Entre as montagens descritas no texto, destacam-se os experimentos com lâmpada comercial de vapor de mercúrio, tais como o espectro de mercúrio e o efeito fotoelétrico.

Scott (2004) apresentou uma planilha da Microsoft Excel que simula um detector de partículas. Segundo o autor, trata-se de um modelo tridimensional que pode ser girado e a trajetória de partículas podem ser destacadas. A planilha modela as potencialidades de um detector de partículas real e pode servir como instrumento educacional.

Eichler *et al.* (2006) apresentaram “A cidade do átomo”, um software educativo criado para desenvolver o tema da radioatividade. Esse ambiente virtual permite o uso de uma estratégia didática baseada no jogo de papéis (*Roleplaying Game*), possibilitando uma discussão sobre a produção de energia elétrica a partir de energia nuclear, permitindo a resolução de problemas relacionados à radiação.

Figueira (2005) apresenta o a ferramenta *Easy Java Simulations-Ejs*. Após uma descrição de suas principais características e potencialidades na produção de simulações-Aplets para o ensino de física, o autor apresenta dois exemplos de aplicação de modelagem em atividades de ensino referentes a um sistema massa-mola e a solução numérica da equação de Schrödinger independente do tempo.

Com base nas reflexões de Einstein sobre a Educação, Medeiros e Medeiros (2005) apresentaram um modo simples de ilustrar o princípio da equivalência contido na teoria da relatividade geral. Após defender a importância da alegria no ensino de ciências e discutir sobre a dimensão do mistério e sobre o conflito cognitivo implicados no uso de brinquedos, os autores apresentaram o experimento de pensamento conhecido como “o elevador de Einstein” e sugeriram três modelos simples para ilustrar tal experimento.

Cavalcante e Haag (2005) apresentaram uma proposta para a determinação experimental da constante de Planck utilizando diodos de emissão de luz como sensores espectrais seletivos da radiação emitida por um filamento aquecido. Os autores apresentam também uma proposta de verificação da lei de Stefan-Boltzmann, permitindo assim uma abordagem experimental da distribuição de energia de um corpo negro.

Ostermann *et al.* (2006) desenvolveram um *software* que simula o interferômetro de Mach-Zehnder, um experimento de interferência quântica análogo ao experimento de dupla fenda. O simulador pode operar em regime monofotônico, trazendo à tona discussões a respeito do caráter quântico dos objetos microscópicos.

Santos (2006) propuseram a construção de diagramas para auxiliar o ensino de RE. Segundo o autor, este recurso pode ser utilizado para construir instrumentos simples para demonstrar efeitos como a dilatação do tempo e a contração espacial, sem o uso do formalismo matemático. O autor também propôs a construção de um pêndulo equivalente para demonstrar a diferença no avanço temporal entre dois sistemas de referência distintos.

Goff (2006) apresentou o jogo da velha quântico: uma metáfora de ensino para lidar com a natureza contra-intuitiva da superposição de estados exibida pelos sistemas quânticos. Segundo o autor, o jogo viabiliza a introdução de MQ no ensino médio sem o uso de matemática avançada. Após adicionar uma única regra de superposição ao jogo da velha clássico, o autor mostrou ser possível ilustrar os principais conceitos da física quântica, tais como estado de um sistema, superposição, colapso, não-localidade, emaranhamento, princípio da correspondência, interferência e correspondência.

#### *Novas propostas e estratégias didáticas*

Alemañ e Pérez (2001) propuseram, para o ensino de RE em nível médio, o resgate das idéias sobre espaço-tempo e representações geométricas introduzidas por Minkowski em 1907. Esta estratégia didática alternativa baseia-se em seis pontos distintos: (a) a crise da física clássica; (b) a relação entre os fenômenos eletromagnéticos e a relatividade galileana; (c) a invariância da velocidade da luz; (d) as características qualitativas dos diagramas de Minkowski; (e) a renúncia da noção de que a massa aumenta com a velocidade; e (f) um vínculo claro entre RE e RG.

Budde *et al.* (2002 a) elaboraram, na Alemanha, um modelo atômico alternativo baseado na equação de Schrödinger e intitulado 'Electronium'. Desenvolvido para facilitar a aprendizagem de alunos acerca dos modelos atômicos quânticos, esse modelo alternativo apresenta o elétron como sendo constituído de uma substância (uma espécie de um líquido) distribuída ao redor do núcleo atômico. O quadrado do módulo da amplitude da função de onda,  $|\psi|^2$ , é interpretado como sendo proporcional a densidade de tal substância e, no estado fundamental, essa densidade decresce linearmente a partir do núcleo. No estado estacionário, a forma do Electronium é constante no tempo. Porém, na transição de um estado excitado para um estado mais baixo a distribuição de densidade da substância muda, causando uma emissão de radiação eletromagnética. Quando a posição do elétron é medida, a carga elétrica concentra-se em um ponto.

No intuito de introduzir aspectos filosóficos nos cursos de MQ, Pospiech (2003) propôs como estratégia didática um diálogo entre três filósofos (um da Antiguidade, um do Iluminismo e um filósofo quântico) sobre alguns resultados da teoria quântica. Após discutir o experimento EPR e algumas questões filosóficas como percepção e realidade, potencialidades e fatos reais, o todo e a parte, entre outros, o autor pôs em pauta os seguintes temas para o diálogo: (a) ser, tornar-se e realidade; (b) objetividade e subjetividade; (c) física clássica e física quântica ou revolução da física quântica?; (d) métodos da física e cognição; (e) imaginação dos átomos.

Barnes *et al.* (2004) desenvolveram uma estratégia para introduzir alguns dos princípios básicos de MQ em um curso conceitual de física para não-cientistas. Os autores utilizaram o modelo do pêndulo simples como ferramenta para discutir a diferença entre a FC e a MQ. Após discutir alguns aspectos históricos e filosóficos, os autores apresentaram os princípios formais da MQ, ilustradas para o "pêndulo quântico". O curso inclui debates e controvérsias filosóficas da teoria quântica, priorização do entendimento conceitual em detrimento do matemático, simulação computacional, colaboração e reflexão entre pares, mapas conceituais como modo de avaliação.

Marques e Silva (2005) utilizaram a Olimpíada Brasileira de Astronomia como meio para introduzir temas de FMC no ensino médio. Essa estratégia teve lugar em um projeto pedagógico denominado "Monitoria Discente", com aulas semanais organizadas à tarde (as aulas regulares são pela manhã). Os autores abordaram noções de RE e RG, dualidade onda-partícula, modelo padrão e física nuclear. As aulas tiveram um caráter conceitual envolveu o uso de recursos didáticos como vídeos, figuras, gráficos, provas anteriores da Olimpíada, simulações e *sites* da Internet sobre os referidos temas.

Ogborn (2005) propôs quatro etapas para introduzir a RE para estudantes de ensino médio. Em defesa da idéia de que “menos pode ser mais”, o autor abriu mão do formalismo presente nas transformadas de Lorentz e sugeriu os seguintes passos: (a) medida do radar da distância e velocidades relativas; (b) efeito Doppler relativístico; (c) mapas do espaço-tempo – o intervalo invariante entre espaço-tempo, dilatação temporal; (d) energia, momento e massa – massa e energia de repouso. O autor argumentou que, não tendo a pretensão de oferecer um curso completo de RE, cada professor deve escolher até onde se deve avançar.

Karakostas e Hadzidaki (2005) discutiram a incompatibilidade das premissas do realismo científico clássico e do construtivismo (duas correntes filosóficas dominantes no âmbito da educação em ciências) com o conteúdo científico da teoria quântica. Tomando como base a “não-separabilidade” e o caráter “dependente de contexto” dos sistemas quânticos, os autores apresentaram um esquema interpretativo alternativo compatível com os resultados atuais da teoria e que, se introduzido adequadamente no ensino de MQ, pode promover uma reconstrução conceitual dos estudantes em direção a uma visão apropriada da natureza.

Para mostrar como a vida e os trabalhos de físicos são moldados por eventos sociais, Mårtensson-Pendrill (2006) apresentou uma discussão sobre o projeto *Manhattan*. Após uma breve descrição de experiências didáticas em curso interdisciplinares para futuros professores, envolvendo o uso recursos didáticos alternativos como artigos, material da *internet* e autobiografias de físicos envolvidos no desenvolvimento da bomba nuclear, a autora apresentou um texto sobre o contexto histórico do projeto como possível referência para cursos interdisciplinares.

Como parte de um projeto envolvendo quinze países da Europa (SUPERCOMET II), Ireson (2006) apresentou uma atividade experimental desenvolvida para medir a temperatura de transição de um material supercondutor. Após a descrição da montagem experimental, o autor apresentou o método de medição para uma amostra de  $YBa_2Cu_3O_7$  e apresentou os resultados em um gráfico de resistência *versus* temperatura.

Preocupados em não transformar as aulas de partículas elementares do ensino médio num zoológico de partículas e reações sem significado, van den Berg e Hoekzema (2006) propuseram uma abordagem centrada nas leis de conservação, nas simetrias e nos diagramas de Feynman. Esse enfoque, segundo os autores, possibilita o aluno avaliar se é possível ocorrer uma reação ou não, além de derivar outras reações por simetria. O método pedagógico utilizado pelos autores é o rápido feedback: uma série de atividades curtas que o aluno desenvolve individualmente e em seguida discute com o professor. Embora os autores tenham descrito o andamento de duas aulas, o trabalho infelizmente não apresenta resultados de pesquisa.

Sánchez e Selva (2006) propuseram uma unidade didática para o ensino de relatividade no ensino médio. Após discutir as deficiências do ensino tradicional, o autor desenvolveu algumas atividades do programa guia sugerido, destacando a definição de quadri-vetor, o uso dos diagramas espaço-tempo e impulso-energia e o conceito de massa invariante. O autor também destacou a importância das atividades no contexto ciência, tecnologia e sociedade e o papel da avaliação e uso de recursos no processo de ensino-aprendizagem de relatividade.

Yoder (2006) desenvolveu uma estratégia didática para lidar com duas das grandes dificuldades enfrentadas pelos estudantes em cursos introdutórios de MQ: (a) o caráter abstrato e contra-intuitivo das situações envolvidas nos problemas de MQ, em contraste com os sistemas físicos da mecânica clássica que são familiares e facilmente visualizáveis; (b) o fato de que as soluções da MQ, obtida em termos de probabilidades, são fundamentalmente diferentes das soluções obtidas na mecânica clássica. Para superar essas barreiras, o autor propõe uma análise de três sistemas físicos simples e facilmente visualizáveis, a saber: uma partícula numa caixa; uma

bola quicando no chão; um oscilador harmônico simples. A idéia é discutir a função densidade de probabilidade, que é dada diretamente na MQ, e calcular essa função para os referidos sistemas clássicos a partir da equação do movimento. Segundo o autor, essa estratégia introduz a MQ como uma extensão natural da FC, permitindo que os estudantes analisem problemas dos quais estão mais familiarizados e trabalhem com a função densidade de probabilidade, aprendendo a interpretá-la e comparando-os os resultados clássicos com os quânticos.

Mald (2006) apresentou um guia para tratar de questões relativas ao ensino de RG em nível de graduação. O autor centrou-se em uma estratégia didática para introduzir o material matemático necessário para abordar a teoria. Após discutir aspectos da geometria diferencial, o autor recomendou os seguintes passos: (a) explicar que o espaço-tempo na relatividade geral *não* tem a estrutura de um vetor de espaço e que as coordenadas  $x^\mu$  são meramente rótulos de eventos no espaço-tempo, desprovidos de qualquer significado físico; (b) introduzir a noção de vetor tangente à curva; (c) introduzir a noção de métrica espaço-tempo como um produto interno de vetores tangentes e determinar o tempo próprio  $\tau$  decorrido ao longo de uma “curva de tempo” (*liketime curve*); (d) introduzir a noção de geodésica de tempo (*liketime geodesic*) como uma curva que maximiza  $\tau$ . De acordo com o autor, a equação geodésica pode ser derivada utilizando-se a variação Euler-Lagrange.

Kovačević e Djordjevich (2006) apresentaram uma analogia mecânica para o efeito fotoelétrico, assunto presente no currículo do último ano do ensino médio das escolas de Sérvia e Montenegro. Preocupados com o ensino desse tema, os autores propuseram um sistema de bolas rígidas e coloridas (onde cada cor corresponde a uma frequência do espectro luminoso) que deslizam sem atrito sobre uma rampa e colidem com outra bola rígida, lançando-a para fora do sistema. A energia inicial de cada fóton (bolas coloridas), bem como a função trabalho do material foto-emissor e a energia cinética máxima dos elétrons emitidos, são analisados em termos de diferença de altura em relação ao ponto mais baixo da rampa.

### *Divulgação científica*

Mackintosh (2001) discutiu a imagem pública da física nuclear, impreterivelmente associada à bomba e aos riscos ambientais referentes à geração de energia elétrica. Em defesa do estudo do núcleo atômico, o autor destaca entre outros aspectos: (a) a formação dos elementos dos quais tudo que vemos é feito; (b) os processos que geram a radiação solar (vital para a vida) e demais estrelas; (c) o fato de que pode servir de “palco” para um seleto grupo de fenômenos quânticos; (d) o fato de ser uma importante “janela” para o mundo microscópico das partículas fundamentais, (e) aplicação na área médica. Para corrigir essa imagem excessivamente negativa da física nuclear, membros da comunidade científica europeia vinculadas ao projeto PAN (*Public Awareness of Nuclear Science*) sugeriram algumas medidas, tais como turnês expositivas, um livro popular e uma página na web. Infelizmente, o projeto foi suspenso porque apenas dois institutos de pesquisa demonstraram interesse em participar.

Bergström *et al.* (2001) oportunizaram ao público geral de Estocolmo, Suécia, uma exposição teórica e experimental da dualidade onda-partícula e outros aspectos da MQ. A motivação para tal exposição, segundo os autores, foi a grande audiência da peça de teatro Copenhagen, em cartaz no *Royal Dramatic Theatre* da Suécia. A peça abordou a visita de Werner Heisenber a Niels Bohr e os supostos diálogos sobre suas interpretações acerca do mundo microscópico geraram grande repercussão entre o público leigo. Os temas abordados pelos autores foram: ondas mecânicas; experimentos com ondas estacionárias; luz como onda e partículas – dualidade onda-partícula; estudo do átomo; relação de incerteza de Heisenberg; experimentos de laboratório sobre a relação de incerteza; flutuações quânticas do vácuo.

Preocupados em explicar o conceito de não-localidade, tratado por Bell pela primeira vez em 1964, para não-especialistas e estudantes pré-universitários, Jacobs e Wiseman (2005) escreveram uma história no estilo dos mistérios de Sherlock Holmes. A trama, baseada na formulação de Mermin da ilustração “paradoxal” da não-localidade quântica descoberta por Greenberger, Horne, and Zeilinger, trata de como a não-localidade pode ser usada para resolver um problema no qual alguém pode se perceber como o resultado de uma série de eventos normais, ainda que de certa forma improváveis.

Johansson *et al.* (2006) descreveram as atividades da semana Einstein, evento de divulgação científica realizado na Casa da Ciência em Estocolmo, Suécia, em comemoração ao Ano Mundial da Física. Sete experimentos ilustraram os trabalhos de Einstein acerca do movimento Browniano, efeito fotoelétrico e a RE, publicados no ano de 1905. As atividades sobre RE envolveram: a dilatação temporal de Einstein e os múons cósmicos; aniquilação pósitron-elétron; a velocidade da luz; elétrons relativísticos; espectro solar. O evento contou com a participação de 260 estudantes de ensino médio, 30 professores e 25 membros do público geral.

### *Análise curricular*

A presente categoria descreve trabalhos que apresentam a análise de currículos de física e mudanças curriculares, análise de livros didáticos que abordam temas de FMC e uma revisão da literatura.

#### *Análise curricular*

Araújo e Rodrigues (2001) compararam as ementas das disciplinas Física Moderna, oferecida nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física, e Mecânica Quântica, oferecida apenas no curso de Bacharelado em Física. A análise das ementas foi feita com base nos livro-texto mais utilizados no ensino dessas disciplinas. Os resultados da análise mostraram que os conteúdos dos dois cursos são praticamente o mesmo. A maior discrepância entre as disciplinas é a ênfase dada aos processos matemáticos em MQ, que utiliza refinados métodos de física matemática, não havendo diferenças com relação aos aspectos qualitativos.

Lobato e Greca (2005) fizeram uma análise dos programas curriculares de ensino médio de vários países que contemplam temas de FMC. Foram analisadas as grades curriculares dos seguintes países: Portugal; Espanha; França; Reino Unido; Dinamarca; Suécia; Canadá; Austrália; Itália; Finlândia. Os temas de FMC encontrados nesse estudo são: quantização e a constante de Planck, dualidade onda-partícula, princípio de incerteza, física atômica e nuclear, física de partículas, efeito fotoelétrico e modelos atômicos.

Brockington & Pietrocola (2005) analisam os requisitos necessários para a inserção de temas de MQ no ensino médio. Com base na teoria da transposição didática de Chevallard, os autores discutem alguns impasses presentes nesse processo e apontam para a necessidade de professores, e da comunidade escolar em geral, libertarem-se das regras que geram o saber escolar tradicional. Os autores defendem que o sucesso de um novo saber escolar deve estar mais atrelado ao seu entendimento, prazer e significação do que a sua capacidade de adaptação ao regime educacional vigente.

#### *Análise de livros didáticos*

A partir de uma construção teórica comprometida com a epistemologia de Toulmin, Arriasecq e Greca (2002) propuseram alguns eixos para a análise de livros didáticos de ensino médio que abordam a RE. Os aspectos destacados são: contextualização histórica da RE; reflexão

epistemológica referente à gênese da RE; repercussão da RE em diferentes âmbitos; discussões conceituais.

Ostermann e Ricci (2002), ao analisarem criticamente alguns livros didáticos de nível médio que abordam noções da RE, concluíram que a grande maioria, quando não apresenta a teoria de forma muito superficial, apresenta em seus textos erros conceituais a respeito da contração de Lorentz-FitzGerald e a aparência visual de objetos relativísticos. Em outro estudo (OSTERMANN, RICCI 2004 b), os autores analisaram dois conceitos amplamente difundidos nos livros didáticos que introduzem a RE: massa relativística e a equivalência massa-energia. Os autores constataram que os textos, além de interpretar de forma errônea a equivalência massa-energia, delegam ao conceito de massa relativística uma importância fundamental, quando, de fato, trata-se de um conceito inadequado que não deveria ser abordado.

### *Revisão da literatura*

Greca e Moreira (2001) fizeram uma revisão na literatura sobre estudos relativos ao ensino introdutório de MQ. Após classificar os trabalhos em três grandes categorias – concepções dos estudantes, críticas à abordagem tradicional e propostas de inovações didáticas – os autores apontaram para escassez de trabalhos que investigue concepções dos estudantes acerca de conceitos de MQ.

### **Considerações finais**

No artigo de revisão bibliográfica sobre o tema FMC no ensino médio, que serviu de ponto de partida para o presente trabalho, Ostermann e Moreira (2000) concluíram afirmando que há uma grande concentração de publicações que apresentam temas de FMC em forma de divulgação ou como bibliografia de consulta para professores. Os autores também apontaram para uma escassez de trabalhos que investigam concepções alternativas relativas a temas contemporâneos. Essa carência de trabalhos que investigam concepções de alunos também foi apontada por Greca e Moreira (2001), conforme visto na seção anterior.

No presente trabalho, fizemos um levantamento de 102 artigos e os classificamos nas categorias: 1) propostas didáticas testadas em sala de aula; 2) levantamento de concepções; 3) bibliografia de consulta para professores; 4) análise curricular.

Dos 102 artigos consultados, 52 trabalhos foram classificados com bibliografia de consulta para professores (categoria 3) enquanto que os 50 trabalhos restantes foram distribuídos entre as demais categorias. Isto significa uma produção de 52 trabalhos de desenvolvimento contra 50 artigos apresentando resultados de pesquisa. Dentre os trabalhos de pesquisa apresentados, constatamos um número de 16 trabalhos que testaram o conhecimento de estudantes (concepções) acerca de temas de FMC, o que corresponde a 32% dos trabalhos de pesquisa consultados e 15,69% da amostra total. Cabe ressaltar que essas concepções a qual nos referimos são, na verdade, o resultado da avaliação de certos conhecimentos específicos e formam, portanto, um conjunto de atitudes, conhecimentos prévios, modelos mentais, modos de raciocínio, entre outras noções gerais.

Com relação às tendências no período de 2001 a 2006, pode-se afirmar que a grande maioria dos temas de pesquisa sobre o ensino de FMC refere-se à MQ. Esses trabalhos totalizam um número de 26 artigos contra 11 trabalhos sobre RE e RG e 13 trabalhos sobre outros temas (radiação, supercondutividade, física de partículas, física nuclear, armas nucleares, etc.). Dos 50 artigos de pesquisas consultados, 22 referem-se à inserção de temas de FMC no ensino médio e um artigo relata uma experiência didática desenvolvida no ensino fundamental. Cabe destacar que

apenas 7 trabalhos da amostra envolveram professores em serviço ou em formação inicial, correspondendo a 14% dos trabalhos de pesquisa e 6,9% da amostra total. Esse resultado pode ser considerado baixo visto a importância do tema e a tradição da formação inicial e continuada de professores enquanto linha de pesquisa da área de ensino de ciências.

No que se refere aos trabalhos de desenvolvimento, 18 artigos apresentam textos didáticos para professores contra uma amostra de 30 artigos que apresentam recursos didáticos (simulações computacionais e experimentos de baixo custo) ou propostas de estratégia didática (modelos didáticos e analogias). Os temas abordados nos textos didáticos referem-se à MQ, RE e RG, física de partículas, supercondutividade, física de plasma e teoria quântica de campos.

É possível constatar que, apesar do notável aumento relativo de publicações sobre o ensino de FMC que apresentam resultados de pesquisa, a maioria dos artigos ainda se refere a bibliografia de consulta para professores. Embora os trabalhos de desenvolvimentos sejam extremamente relevantes para o ensino de ciências, pois são fontes de informação e recursos para professores e alunos, é necessário que o material resultante desses trabalhos seja submetido a uma avaliação crítica para verificar em que medida eles realmente facilitam os processos de ensino-aprendizagem. De maneira análoga, a maioria dos trabalhos de pesquisas que avaliam propostas didáticas em sala de aula se ocupa da organização do conteúdo e do rigor científicos com que eles são apresentados. Embora o rigor e a ênfase em conceitos-chave sejam imprescindíveis para um bom ensino, é necessário também investigar os processos conduzidos em sala de aula que estruturam e condicionam a aprendizagem. Somente assim poderemos adquirir uma melhor compreensão dos mecanismos utilizados por professores e alunos na construção de conhecimentos relativos a temas de FMC.

## Referências

- ABD-EL-KHALICK, F. Rutherford's enlarged: a content-embedded activity to teach about nature of science. *Physics Education*, London, v. 37, n. 1, p. 64-68, Jan. 2002.
- ALEMAÑ, R. A.; PÉREZ, J. F. Una nueva propuesta didáctica para la enseñanza de la relatividad en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 19, n. 2, p. 335-340, Jul. 2001.
- ALSOP, S. Living with and learning about radioactivity: A comparative conceptual study. *International Journal of Science Education*, London, v. 23, n. 3, p. 263-281, Jan. 2001.
- ANJOS, R. M.; FACURE, A.; LIMA, E. L. N.; GOMES, P. R. S.; SANTOS, M. S.; BRAGE, J. A. P.; OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M.; UMISEDÓ, N. K. Radioactivity teaching: Environmental consequences of the radiological accident in Goiânia (Brazil). *American Journal of Physics*, Melville, v. 69, n. 3, p. 377-381, Mar. 2001.
- ARAÚJO, W. S.; RODRIGUES, C. G. Comparando ementas de um curso de Mecânica Quântica e Física Moderna. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 360-365, set. 2001.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Algunas consideraciones históricas, epistemológicas y didácticas para el abordaje de la relatividad especial en el nivel medio y polimodal. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 8, n. 1, p. 55-69, mar. 2002.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Enseñanza de la teoría de la relatividad especial en el ciclo polimodal: dificultades manifestadas por los docentes y textos de uso habitual. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vigo, v. 3, n. 2, 2004. Disponível em: <[www.saum.uvigo.es/reec](http://www.saum.uvigo.es/reec)>. Acesso em: 16 fev. 2007.
- ARRIASSECQ, I.; GRECA, I. M. Introducción de la teoría de la relatividad especial en el nivel medio/polimodal de enseñanza: identificación de teoremas-en-acto y determinación de objetivos-

obstáculo. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 01-21, ago. 2006.

ARRUDA, S. M.; TOGINHO FILHO, D. O. Laboratório caseiro de Física Moderna. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 390-394, nov. 2004. ed. esp.

BARNES, M. B.; GARNER, J.; REID, D. The pendulum as a vehicle for transitioning from Classical to Quantum Physics: history, quantum concepts and educational challenges. *Science & Education*, New York, v. 13, n. 4-5, 417-436, July 2004.

BERGSTRÖM, L.; JOHANSSON, K. E.; NILSSON, Ch. The physics of Copenhagen for students and the general public. *Physics Education*, London, v. 36, n. 5, p. 388-393, Sept. 2001.

BLACK, E. D.; GUTENKUNST, R. N. An introduction to signal extraction in interferometric gravitational wave detectors. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 4, p. 365-378, Apr. 2003.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, dez. 2005.

BUDDE, M.; NIEDDERER, H.; SCOTT, P.; LEACH, J. 'Electronium': a quantum atomic teaching model. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 197-203, May 2002 a.

BUDDE, M.; NIEDDERER, H.; SCOTT, P.; LEACH, J. The quantum atomic model 'Electronium': a successful teaching tool. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 204-210, May 2002 b.

BUNGE, M. Twenty-five centuries of quantum physics: From Pythagoras to us, and from subjectivism to realism. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5-6, p. 445-466, Aug. 2003.

CARSTENS-WICKHAM, B. The Atomic Era: A new interdisciplinary course combining physics, the humanities and the social sciences. *Physics Education*, London, v. 36, n. 3, p. 212-217, May 2001.

CATALOGLU, E.; ROBINETT, R. W. Testing the development of student conceptual and visualization understanding in quantum mechanics through the undergraduate career. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 238-250, Mar. 2001.

CAVALCANTE, M. A.; HAAG, R. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 343-348, set. 2005.

CAVALCANTE, M. A.; PIFFER, A.; NAKAMURA, P. O Uso da Internet na Compreensão de Temas de Física Moderna para o Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 108-112, mar. 2001.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de Física Moderna que visa sua inserção no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 263-276, dez. 2001.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; SOUZA, D. F.; MUZINATTI, J. Uma Aula sobre o Efeito Fotoelétrico no Desenvolvimento de Competências e Habilidades. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 24-29, maio 2002.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; HAAG, R. Experiências em Física Moderna. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 75-82, mai. 2005.

DANIEL, M. Particles, Feynman diagrams and all that. *Physics Education*, London, v. 41, n. 2, p. 119-129, May 2006.

DIAS, N. L.; PINHEIRO, A. G.; BARROSO, G. C. Laboratório Virtual de Física Nuclear. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 232-236, jun. 2002.

DUNNE, P. Looking for consistency in the construction and use of Feynman diagrams. *Physics*

*Education*, London, v. 36, n. 5, p. 366-374, Sept. 2001.

DUNNE, P. A reappraisal of the mechanism of pion exchange and its implications for the teaching of particle physics. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 211- 222, May 2002.

EICHLER, M. L.; JUNGES, F.; DEL PINO, J. C. Cidade do Átomo, um Software para o Debate Escolar sobre Energia Nuclear. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 17-21, mai. 2006.

FIGUEIRA, J. S. Easy Java Simulations – Modelagem computacional para o ensino de física. *Revista Brasileira de ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 613-618, dez. 2005.

FREIRE JR., O. A Story Without an Ending: The Quantum Physics Controversy 1950–1970. *Science & Education*, New York, n. 12, nº 5-6, p. 573-586, Aug. 2003.

GOFF, A. Quantum tic-tac-toe: A teaching metaphor for superposition in quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 11, p. 962-973, Nov. 2006.

GRECA, I. M.; FREIRE Jr., O. Does an emphasis on the concept of quantum status enhance student's understanding of Quantum Mechanics? *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5-6, p. 541-557, Aug. 2003.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona, v. 20, n. 2, p. 327-338, jun. 2002.

GRECA, I. M.; HERSCOVITZ, V. E. Superposição linear em ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 61-77, jan. 2005.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão de literatura sobre estudos relativos ao ensino da Mecânica Quântica introdutória. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 29-56, mar. 2001.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. Uma Proposta para o Ensino de Mecânica Quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

GUNEL, M.; HAND, B.; GUNDUZ, S. Comparing student understanding of quantum physics when embedding multimodal representations into two different writing format: presentation format versus summary report format. *Science Education*, Hoboken, v. 90, n. 6, p. 1092-1112, Nov. 2006.

HOBSON, A. Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses. *American Journal of Physics*, Melville, v. 73, n. 5, p. 630-634, May 2005.

HOLBROW, C. H.; GALVEZ, E.; PARKS, M. E. Photon quantum mechanics and beam splitters. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 260-264, Mar. 2002.

IRESON, G. Measuring the transition temperature of a superconductor in a pre-university laboratory. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 556-559, Nov. 2006.

JACOBS, K.; WISEMAN, H. M. An entangled web of crime: Bell's theorem as a short story. *American Journal of Physics*, Melville, v. 73, n. 10, p. 932-937, Oct. 2005.

JOHANSSON, K. E.; KOZMA, C.; NILSSON, Ch. Einstein for schools and the general public. *Physics Education*, London, v. 41, n. 4, p. 328-333, July 2006.

JOHANSSON, K. E.; NILSSON, C.; ENGTEDT, J. SANDQVIST, A. Astronomy and particle physics research classes for secondary school students. *American Journal of Physics*, Melville, v. 69, n. 5, p. 576-581, May 2001.

JONES, G. T. The uncertainty principle, virtual particles and real forces. *Physics Education*, London, v. 37, n. 3, p. 223-233, May 2002.

KALKANIS, G.; HADZIDAKI, P.; STAVROU, D. An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concept. *Science Education*, Hoboken, v. 87, n.2, p. 257-279,

Mar. 2003.

KARAKOSTAS, V.; HADZIDAKI, P. Realism vs. Constructivism in Contemporary Physics: The Impact of the Debate on the Understanding of Quantum Theory and its Instructional Process. *Science & Education*, New York, v.14, n. 7-8, p. 607-629, Nov. 2005.

KARAM, R. A. S.; SOUZA CRUZ, S. M. S. C.; COIMBRA, D. Tempo relativístico no início do Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 3, p. 373-386, set. 2006.

KE, J; MONK, M; DUSCHL, R. Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. *International Journal of Science Education*, London, v. 27, n. 13, p. 1571-1594, Feb. 2005.

KENNY, P. Time dilation in special relativity: an alternative derivation. *Physics Education*, London, v. 41, n. 4, p. 334-336, July 2006.

KOFOED, M. H. The Hiroshima and Nagasaki bombs: role-play and students' interest in physics. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 502-507, Nov. 2006.

KÖHNLEIN, J. F. K; PEDUZZI, L. O. Q. Uma discussão sobre a natureza da ciência no ensino médio: um exemplo com a teoria da relatividade restrita. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 36-70, abr. 2005.

KOVAČEVIĆ, M. S.; DJORDJEVICH, A. A mechanical analogy for the photoelectric effect. *Physics Education*, London, v. 41, n. 6, p. 551-555, Nov. 2006.

LEVRINI, O. Reconstructing the Basic Concepts of General Relativity from an Educational and Cultural Point of View. *Science & Education*, New York, v. 11, n. 3, p. 263-278, May. 2002.

LÉVY-LEBLOND, J. M. On the Nature of Quantons. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5-6, p. 495-502, Aug. 2003.

LINTON, J. O. The Doppler shift and the photon. *Physics Education*, London, v. 36, n. 4, p. 320-321, July, 2001.

LOBATO, T; GRECA, I. M. Análise da inserção de conteúdos de Teoria Quântica nos currículos de Física do Ensino Médio. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 1, p. 119-132, mai. 2005.

LOVELL, M. S. Relativity and gravitation on Ollie and Phil's planet—a three-dimensional approach. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 223-228, May 2005.

MACHADO, D. I; NARDI, R. Construção de conceitos de física moderna e sobre a natureza da ciência com suporte da hipermídia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, p. 473-485, dez. 2006.

MACKINTOSH, R. S. Telling the world about nuclear physics. *Physics Education*, London, v. 36, n. 1, p. 35-39, Jan. 2001.

MALD, R. M. Resource Letter TMGR-1: Teaching the mathematics of general relativity. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 6, p. 471-477, June 2006.

MARQUES, A. J; SILVA, C. E. Utilização da Olimpíada Brasileira de Astronomia como Introdução à Física Moderna no Ensino Médio. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 34-35, out. 2005.

MÅRTENSSON-PENDRILL, A. The Manhattan project—a part of physics history. *Physics Education*, v. 41, n. 6, p. 493-501, Nov. 2006.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. Einstein, a física dos brinquedos e o princípio da equivalência. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 22, n. 3, p. 299-315, dez. 2005.

MERMIN, N. D. From Cbits to Qbits: Teaching computer scientists quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 71, n. 1, p. 23-30, Jan. 2003.

- MONTENEGRO, R. L.; PESSOA JR., O. Interpretações da Teoria Quântica e as Concepções dos Alunos do Curso de Física. *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 2, p. 107-126, ago. 2002.
- MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 200-209, Mar. 2002.
- OGBORN, J. Introducing relativity: less may be more. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 213-222, May 2005.
- OGBORN, J.; TAYLOR, E. F. Quantum physics explains Newton's laws of motion. *Physics Education*, v. 40, n. 1, p. 26-34, Jan. 2005.
- OLSEN, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. *International Journal of Science Education*, London, v. 24, n. 6, p. 565-574, June 2002.
- OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M. Preparing teachers to discuss superconductivity at high school level: a didactical approach. *Physics Education*, London, v. 41, n. 1, p. 34-41, Jan. 2006.
- 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*, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan. 2000.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Updating the physics curriculum in high schools: a teaching unit about superconductivity. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vigo, v. 3, n. 2, 2004. Disponível em: <[www.saum.uvigo.es/reec](http://www.saum.uvigo.es/reec)>. Acesso em: 23 jan. 2007.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. Um Pôster para Ensinar Física de Partículas. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 13-18, out. 2001.
- OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, fev. 2005.
- OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. Desenvolvimento de um Software para o Ensino de Fundamentos de Física Quântica. *A Física na Escola*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 22-25, maio 2006.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e a aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 2, p. 176-190, ago. 2002.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 11, n. 2, p. 235-258, maio 2004 a.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 83- 102, abr. 2004 b.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. S. F. Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relatos de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 09-35, abr. 2005.
- PASCOLINI, A.; PIETRONI, M. Feynman diagrams as metaphors: borrowing the particle physicist's imagery for science communication purposes. *Physics Education*, London, v. 37, n. 4, p. 324-328, July 2002.
- PAULO, I. J. C.; MOREIRA, M. A. Abordando conceitos fundamentais da mecânica quântica no nível médio. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 63-73, maio 2004.
- PEDUZZI, L. O. Q. Física e filosofia: uma aproximação através de um texto na disciplina estrutura

- da matéria. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 05-20, maio 2004.
- PEDUZZI, L. O. Q.; BASSO, A. C. Para o ensino do átomo de Bohr no nível médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 545-557, dez. 2005.
- PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Uma análise da produção acadêmica recente sobre o ensino de física moderna e contemporânea no Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 6., Florianópolis. Anais do ... E. F. Mortimer (Org.) Florianópolis: ABRAPEC, 2007. 1 CD-ROM.
- PÉRES, H.; SOLBES, J. Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 21, n.1, p. 135-146, marzo 2003.
- PÉRES, H.; SOLBES, J. Una propuesta sobre enseñanza de la relatividad en el bachillerato como motivación para el aprendizaje de la física. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 24, n.2, p. 269-284, Jun. 2006.
- POSPIECH, G. Philosophy and Quantum Mechanics in Science Teaching. *Science & Education*, New York, v. 12, n. 5-6, p. 559-571, Aug. 2003.
- REGO, F.; PERALTA, L. Portuguese students' knowledge of radiation physics. *Physics Education*, London, v. 41, n. 3, p. 259-262, May 2006.
- SAMAGAIA, R.; PEDUZZI, L. O. Q. Uma experiência com o projeto Manhattam no Ensino Fundamental. *Ciência & Educação*. Bauru, v. 10, n. 2, p. 259-276, maio 2004.
- SÁNCHEZ, M. A.; SELVA, V. S. La relatividad en el bachillerato. Una propuesta de unidad didáctica. *Enseñanza de la Ciencias*, Barcelona, v. 24, n. 3, p. 439-352, nov. 2006.
- SANTIAGO, M. A. M; TAVARES, M; CAVALCANTI, G. H. Elaboração de um Curso Introdutório de Física de Plasma. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 104-107, mar. 2001.
- SANTOS, R. P. B. Relatividade restrita com o auxílio de diagramas. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 23, n. 2, p. 238-255, ago. 2006.
- SCHERR, R. E.; SHAFFER, P. S.; VOKOS, S. Student understanding of time in special relativity: simultaneity and reference frames. *American Journal of Physics*, Melville, v. 69, n. 7, p. 24-35, July 2001.
- SCHERR, R. E.; SHAFFER, P. S.; VOKOS, S. The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 12, p. 1238-1248, Dec. 2002.
- SCOTT, A. J. 3-D spreadsheet simulation of a modern particle detector. *Physics Education*, London, v. 39, n. 1, p. 91-95, Jan. 2004.
- SILVA, J. A.; KAWAMURA, M. R. D. A natureza da luz: uma atividade com textos de divulgação científica em sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 317-340, dez. 2001.
- SINGH, C. Student understanding of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 69, n. 8, p. 885-895, Aug. 2001.
- TABER, S. K. When the analogy breaks down: modelling the atom on the solar system. *Physics Education*, v. 36, n. 3, p. 222-226, May 2001.
- TABER, S. K. Learning quanta: barriers to stimulating transition in student understanding of orbital ideas. *Science Education*, Hoboken, v. 89, n.1, p. 257-279, Jan. 2005.
- TRINDADE, J.; FIOLHAIS, C.; GIL, V. Atomic orbitals and their representation: Can 3-D

computer graphics help conceptual understanding? *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 319-325, set. 2005.

VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M. Ensinando física moderna no ensino médio: efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 21, p. 359-371, nov. 2004. ed. esp.

VAN DEN BERG, E.; HOEKZEMA, D. Teaching conservation laws, symmetries and elementary particles with fast feedback. *Physics Education*, London, v. 41, n. 1, p. 47-56, Jan. 2006.

WILLIAMS, G. Antimatter and 20th century science. *Physics Education*, London, v. 40, n. 3, p. 238-244, May 2005.

WITTMANN, M. C.; STEINBERG, R. C.; REDISH, E. F. Investigating student understanding of quantum physics: Spontaneous model of conductivity. *American Journal of Physics*, Melville, v. 70, n. 3, p. 218-226, Mar. 2002.

YANG, F. Senior high school students' preference and reasoning modes about nuclear energy use. *International Journal of Science Education*, London, v. 25, n. 2, p. 221-244, Jan. 2003.

YODER, G. Using classical probability functions to illuminate the relation between classical and quantum physics. *American Journal of Physics*, Melville, v. 74, n. 5, p. 404-411, May 2006.

Recebido em: 16.01.08

Aceito em: 21.12.09