

CONSTRUINDO UMA UNIDADE DIDÁTICA CONCEITUAL SOBRE MECÂNICA QUÂNTICA: UM ESTUDO NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES DE FÍSICA¹

Constructing a conceptual Quantum Mechanics teaching unit: a study in the preparation of Physics teachers

Fernanda Ostermann²

Trieste S. F. Ricci³

Resumo: Neste trabalho, apresentamos os resultados obtidos com a implementação de uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica (MQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” da primeira turma (ano de 2002) do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MPEF-UFRGS). A avaliação da aprendizagem foi realizada a partir da aplicação de um instrumento especialmente construído para fazer um levantamento das noções básicas sobre Mecânica Quântica (MQ) de professores de Física de Ensino Médio em formação e em serviço. Os resultados da aplicação do instrumento demonstraram que os professores-alunos apresentavam lacunas importantes em relação a aspectos conceituais básicos de MQ antes do curso. Com o desenvolvimento da unidade conceitual, foi possível promover mudanças em suas concepções, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

Unitermos: formação de professores, mecânica quântica, avaliação da aprendizagem.

Abstract: *In this work, we present the results obtained from the implementation of a conceptual Quantum Mechanics unit. The teaching of this unit took place in the subject “Modern and Contemporary Physics Topics I”, pertaining to the graduate curriculum designed to prepare Masters in Physics Education at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Brazil. The learning evaluation of basic conceptual aspects of QM was done through the application of a questionnaire before and after the lectures. The results before the lectures have shown that the students had important conceptual shortcomings in QM. After the implementation of the conceptual QM unit, it was possible to observe changes in their conceptions, especially those involved with the distinction between classical and quantum objects.*

Keywords: *teacher's preparation, quantum mechanics, learning evaluation.*

Introdução

Este trabalho tem por objetivo relatar a implementação de uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica (MQ) na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” (TFMC1) da primeira turma (18 alunos) do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física (MPEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, durante o segundo semestre de 2002. A avaliação da aprendizagem foi realizada a partir da aplicação de um

¹ Artigo adaptado de uma comunicação oral apresentada no 4º Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências, Bauru, 25 a 29 de novembro de 2003.

² Professora adjunta doutora em Ciências, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (e-mail: fernanda@if.ufrgs.br).

³ Professor-adjunto doutor em Ciências, Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

instrumento especialmente construído para fazer um levantamento das noções básicas sobre Mecânica Quântica (MQ) de professores de Física de Ensino Médio em formação e em serviço (Ostermann e Ricci, 2003).⁴

A motivação para o trabalho surgiu da necessidade de preparar um curso introdutório à MQ para professores-alunos do MPEF que rompesse com a abordagem dos cursos tradicionais geralmente ministrados na graduação e na pós-graduação. Dada a natureza do Mestrado Profissionalizante – cujo objetivo é melhorar a qualificação profissional de professores de Física do nível médio através do desenvolvimento de um produto educacional que possa promover mudanças na sua prática docente – a disciplina TFMC1 busca promover a compreensão aprofundada dos conceitos e das noções básicas da MQ em moldes diferentes da abordagem tradicionalmente adotada em cursos sobre o tema, pelo menos até recentemente. Nesta abordagem, há uma forte ênfase no emprego do formalismo matemático como mera ferramenta matemática, na resolução de listas de problemas, além de introduzir a MQ de maneira fortemente correlacionada com a Física Clássica, seja em seus fundamentos e pressupostos mais básicos, seja em sua história. A abordagem tradicional, portanto, acaba relegando a um segundo plano a questão crucial de que os objetos quânticos são de uma natureza muito diversa dos objetos clássicos em si mesmos (pensemos, por exemplo, no tempo gasto com modelos semiclássicos). Com a inclusão de uma unidade conceitual de MQ, esperamos ser possível resgatar aspectos fundamentais para o entendimento da natureza quântica desde o início do aprendizado, a fim de que o professor aprenda significativamente o conteúdo; e que isso permita-lhe vislumbrar possibilidades de introdução do tema no Ensino Médio. O trabalho teve início com uma revisão da literatura recente acerca do ensino de MQ, tanto em nível médio como em cursos universitários de graduação. A revisão envolveu trabalhos que discutem tanto questões de ensino relacionadas ao tema, como instrumentos construídos para a detecção de concepções de alunos e professores de Física sobre a MQ. A seguir, comentamos, brevemente, os trabalhos encontrados na literatura que mais nos subsidiaram para o desenvolvimento da unidade conceitual e do instrumento de avaliação.

Müller e Wiesner (2002), da Universidade de Munique, Alemanha, elaboraram um curso introdutório em MQ no qual tópicos conceituais relevantes foram ensinados a alunos do nível correspondente ao nosso Ensino Médio. Uma das novidades do curso é que se pretende ensinar diretamente os princípios básicos da mecânica ondulatória, sem qualquer referência prévia a modelos atômicos semiclássicos, tais como o modelo de Bohr. Outra novidade é o uso exploratório de dois *softwares* do tipo “bancada virtual” (um do interferômetro de Mach-Zehnder e outro do experimento da fenda dupla realizado com feixes de elétrons), com os quais os estudantes são estimulados a explorar, desde o início do curso, os aspectos puramente quânticos que contrastam radicalmente com nossa experiência cotidiana. Esse trabalho exerceu forte influência sobre a preparação do curso de MQ descrito em uma seção subsequente, no qual também foram utilizados os mesmos dois *softwares* citados, com ajuda de roteiros exploratórios especialmente elaborados.

Pinto e Zanetic (1999) utilizaram a noção de perfil epistemológico, de Gaston Bachelard, como referencial teórico para elaborar um teste para investigar o perfil epistemológico do aluno. Esse teste serviu de referencial para uma atividade educacional desenvolvida em escola pública com objetivo de abordar a MQ no Ensino Médio.

Com a finalidade de introduzir temas de Física Moderna no Ensino Médio, Cavalcante e Tavoraro (2001) desenvolveram uma oficina de Física Moderna a partir do

⁴ Trabalho apresentado no XV SNEF Belo Horizonte, 21 a 26 de março de 2003.

estudo do comportamento dual da matéria. A oficina resultou na produção de materiais didáticos de baixo custo e na realização de uma série de experimentos de interferência, com a finalidade de desenvolver no aluno uma intuição da MQ em sua versão ondulatória (Mecânica Ondulatória de Schrödinger).

Para fazer com que estudantes dos cursos de engenharia compreendam melhor os conceitos centrais da MQ, Greca *et al.* (2001) desenvolveram uma proposta didática de ensino sobre o tema. O trabalho foi implementado em três turmas da disciplina de Física IV, para alunos de engenharia, onde esses temas são tradicionalmente introduzidos, sendo que em uma delas usou-se a abordagem fenomenológica-conceitual proposta no trabalho e nas outras duas o assunto foi introduzido da maneira tradicional. Os resultados obtidos da análise de grupos indicam que a nova abordagem utilizada foi bem sucedida.

Scarani e Suarez (1998) propõem introduzir a MQ a partir da exploração da interferência luminosa num arranjo experimental que é, basicamente, um interferômetro de Mach-Zehnder. O conceito de dualidade onda-partícula é particularmente explorado com os alunos. Infelizmente, os autores não relatam os resultados da aplicação do curso em sala de aula.

Apesar de não propor qualquer instrumento ou material didático ou estratégia de ensino concreta, um artigo de Pessoa Jr. (1997), abordando de maneira muito feliz aspectos conceituais fundamentais da MQ, foi-nos muito útil como suporte na elaboração da unidade conceitual da disciplina de introdução à MQ do MPEF. O aspecto mais original da proposta teórica de Pessoa Jr. é que ela pressupõe que, desde o início do aprendizado, o aluno tenha contato com as diferentes interpretações da teoria da MQ, o que, provavelmente, é relevante para o entendimento do tema.

Nessa mesma linha, Montenegro e Pessoa Jr. (2002), partindo de algumas das principais interpretações oficiais da MQ, investigam as interpretações “privadas” que os alunos desenvolvem ao longo do curso. Os instrumentos utilizados nesta investigação são questionários contendo perguntas abertas e fechadas sobre temas tais como o experimento da fenda dupla, o princípio da incerteza e o postulado da projeção. Os resultados mostraram que os alunos mudam de interpretação dependendo do problema físico envolvido, e que é possível relacionar as interpretações “privadas” com as “oficiais” sem ser possível, entretanto, reduzi-las a categorias estanques.

Analisando o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) do nível A (“A-Level”)⁵ e na universidade, na Inglaterra, Jones (1991) critica a ênfase dada ao efeito fotoelétrico e à “velha Teoria Quântica”. O autor questiona a abordagem estritamente historiográfica com que os temas são abordados. Segundo ele, o experimento do efeito fotoelétrico não é a pedra angular da MQ e, portanto, construir o ensino a partir do conceito de fóton não é somente uma grande simplificação, mas também uma imagem falsa que pode fixar-se na mente dos estudantes. Jones fornece algumas sugestões preliminares para evitar tal caminho historiográfico da velha teoria quântica, propondo que sejam introduzidos os “caminhos lógicos” que levam à formulação da Schrödinger e Heisenberg da MQ.

Solbes *et al.* (1987), ao estudarem a introdução dos modelos quânticos na escola e no 1º ano universitário, na Espanha, através da análise de 56 livros-texto, concluíram que, de maneira geral, tal introdução ocorre de forma incorreta e confusa. Por exemplo, a maioria dos textos para o nível médio não aborda o efeito fotoelétrico como ruptura com a Física Clássica. Com relação à dualidade onda-partícula, alguns autores continuam encarando-a como decorrentes de algumas deficiências técnicas. Os autores assinalam que erros conceituais em livros constituem uma das fontes mais importantes das concepções alternativas que os alunos possuem.

⁵ Curso pré-universitário dirigido a estudantes com idades entre 16 e 18 anos.

Stefanel (1998) relata uma experiência de três anos com uma proposta didática de introdução de tópicos de MQ nos cursos de nível médio na Itália, em particular no 5º ano do “Liceo Scientifico Statale”. A abordagem apresenta uma estrutura que pode ser esquematizada em quatro níveis de intervenção: experiências introdutórias e apresentação da gênese da MQ (5-6 horas); aprofundamento quantitativo sobre efeito fotoelétrico, efeito Compton, fóton, experiência de Frank-Hertz, modelos atômicos e princípio da incerteza (5-6 horas); princípios básicos da MQ: interpretação probabilística da função de onda e do princípio da superposição (5-7 horas); aplicação dos conceitos da MQ para explicar as propriedades da matéria (6-8 horas). A avaliação dos alunos sugeriu que os resultados de aprendizagem foram satisfatórios. No entanto, Stefanel (1998) concluiu que, entre outros aspectos, é preciso realizar pesquisa adicional acerca do ensino de MQ para verificar, por exemplo, se a utilização de modelos clássicos está ou não relacionada à origem de erros conceituais em MQ e se é possível analisá-los para construir uma abordagem didática eficiente.

Fischler e Lichtfeldt (1992) consideram que a aprendizagem de FMC é dificultada porque o ensino, freqüentemente, emprega analogias clássicas. Por exemplo, o átomo de Bohr, uma vez aprendido, passa a ser um obstáculo para a compreensão de idéias modernas. Uma nova concepção de abordagem da MQ para o nível médio é sugerida, a partir de cinco premissas básicas: referências à Física Clássica devem ser evitadas; introdução do efeito fotoelétrico a partir das características dos elétrons e não das dos fótons; a interpretação estatística do fenômeno deve ser usada e descrições dualistas devem ser evitadas; relação de incerteza de Heisenberg deve ser introduzida desde o início (e formulada para objetos quânticos); exclusão do modelo de Bohr no tratamento do átomo de hidrogênio.

Gil *et al.* (1988) mostram, a partir de uma análise de 42 livros didáticos espanhóis de Física, que a maioria destes não fazia nenhuma referência ao caráter não-linear do desenvolvimento científico, às dificuldades que originaram a crise da Física Clássica e às profundas diferenças conceituais entre a Física Clássica e a Moderna. Para os autores, essa visão simplista com que a FMC é ensinada nas escolas produz sérias concepções alternativas. Através de um questionário respondido por 536 alunos, entre 16 e 18 anos, verificou-se que a grande maioria ignorava a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica e desconhecia as diferenças entre Física Moderna e Clássica. Os autores sugerem, então, uma abordagem construtivista para o ensino de FMC, na qual a orientação tradicional de ensino-aprendizagem, que enfatiza a simples transmissão/recepção de conhecimento, seja substituída por um currículo que envolve os alunos em “atividades” e os coloca frente a situações problemáticas através das quais o conhecimento pode ser (re)construído. Os conceitos de FMC foram introduzidos tendo-se como referencial um modelo construtivista de ensino-aprendizagem na perspectiva da mudança conceitual e metodológica (Gil *et al.*, 1988; Solbes *et al.*, 1987). As quatro primeiras atividades, que constituem a introdução ao programa completo, envolveram: revisão das principais contribuições da Física Clássica; formação de uma imagem do conceito de matéria compatível com a Física Clássica; reconhecimento de que a Física é uma construção humana e que pode não resolver alguns problemas relevantes. Reconhecimento, ao mesmo tempo, de que a Física pré-galileana foi substituída pelo novo paradigma clássico; concepção da Física Clássica como um corpo coerente de conhecimentos que consegue explicar quase todos os fenômenos conhecidos no século XIX, falhando em alguns poucos casos; enumeração destes problemas não resolvidos. O programa completo de atividades foi aplicado para 180 alunos (entre 16 e 18 anos) e os resultados obtidos foram satisfatórios (Gil *et al.*, 1988).

Ireson (2000) discute os resultados da aplicação de um questionário tipo Likert (29 afirmativas sobre MQ) respondido por 342 estudantes de graduação em Física de seis instituições do Reino Unido. (Este instrumento serviu de forte inspiração para a elaboração do nosso questionário.) A partir de uma análise estatística das respostas, o autor sugere diretrizes para a organização de cursos sobre o tema, em especial, assinalar a necessidade de partir-se das idéias prévias dos estudantes para a construção dos significados contra-intuitivos da MQ.

Em um estudo de caso, Petri e Niedderer (1998) descrevem o processo de aprendizagem de um estudante de nível médio, na Alemanha, em aulas sobre modelos atômicos. Apesar de o ensino visar a concepção quântica de átomo (modelo de nuvem eletrônica), o acompanhamento da aprendizagem do aluno mostrou que suas concepções de átomo podem ser descritas como uma seqüência de modelos metaestáveis que inicia com o modelo planetário e termina em três modelos que co-existem: o planetário, o modelo de “estado de elétron” e o modelo de nuvem eletrônica.

Johnston *et al.* (1998) estudaram como as idéias fundamentais de MQ são entendidas por estudantes de graduação em Física que foram bem sucedidos em disciplinas sobre o tema. A partir de perguntas como “O que é uma partícula?”; “O que é uma onda?”; “Qual a diferença entre indeterminação e incerteza?”, os autores constataram que os estudantes formulavam respostas fragmentadas expressas por modelos mentais que não passavam de uma coleção de fatos isolados. Os autores alertam para a necessidade de repensar os cursos universitários de MQ, principalmente no que se refere ao seu caráter extremamente matemático.

De modo geral, concluímos que existe uma enorme carência de discussões acerca dos aspectos conceituais e filosóficos da MQ, tanto nos cursos de graduação como nos de pós-graduação. Para usar uma expressão coloquial, na maioria das vezes os professores de MQ “se escondem atrás da matemática”, evitando abordar tais aspectos. Outra conclusão a que chegamos é que são também escassas as propostas de introdução de MQ no Ensino Médio e na formação de professores, e não apenas no Brasil ou na América Latina. Também podemos concluir que praticamente inexistem pesquisas para investigar concepções de alunos e professores em MQ, o que justifica o investimento na elaboração de um instrumento para levantar tais concepções e na estruturação de uma unidade didática conceitual sobre MQ descritos a seguir.

Descrição do questionário de avaliação

O instrumento consiste de três partes: uma primeira contendo 6 questões abertas extraídas ou adaptadas de artigos de pesquisa em ensino de Física; uma segunda parte consistindo de questões objetivas retiradas de concursos vestibulares, exames nacionais de cursos (“Provão” do MEC) e artigos de pesquisa em ensino de Física; e uma terceira, contendo 20 afirmativas, frente às quais o professor-aluno deve posicionar-se empregando uma escala Likert.

As questões abertas foram elaboradas para que o professor-aluno pudesse expressar-se livremente acerca de aspectos essenciais da MQ e que representam uma ruptura radical com a visão de mundo clássica. São elas:

- 1) *Por volta de 1860, os físicos acreditavam que a física havia atingido o máximo grau de desenvolvimento e que só seriam possíveis pequenas alterações e avanços secundários. Porém, no início do século XX, descobriu-se uma série de fatos que não podiam ser explicados pela física clássica, e que provocaram uma crise que se traduziu no surgimento de um novo paradigma teórico (a física moderna e contemporânea). Cite e comente, no mínimo, três desses fatos.*

- 2) *Na sua opinião, existe diferença essencial entre as visões de mundo proporcionadas pela física clássica e pela física quântica? Justifique sua resposta.*
- 3) *Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos clássicos?*
- 4) *Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos quânticos?*
- 5) *Na sua opinião, qual é a principal diferença entre objetos clássicos e objetos quânticos?*
- 6) *O que você entende por “fóton”?*

Com as 11 questões objetivas, pretendemos verificar se os professores estão aptos a ensinar conteúdos básicos de MQ a alunos de Ensino Médio com o objetivo de prepará-los para o exame de vestibular (7 questões). Por outro lado, essas questões também visam detectar possíveis lacunas na formação de graduação dos professores acerca de conteúdos de MQ abordados no “Provão” do MEC (3 questões). Apenas uma das questões objetivas foi adaptada de um artigo de pesquisa em ensino de Física (Gil *et al*, 1988).

A terceira parte consistiu de 20 afirmativas diante das quais o professor-aluno deveria posicionar-se usando uma escala tipo Likert (CF = concordo fortemente; C = concordo; NO = não tenho opinião; D = discordo; e DF = discordo fortemente). Essas afirmativas foram, em grande parte, inspiradas no artigo de Ireson (2000), no qual o autor propõe uma série de 29 afirmativas sobre a MQ. Esse trabalho foi o único encontrado na literatura em que há uma apresentação completa de um instrumento para a detecção de concepções de estudantes sobre a MQ. Parte das questões foram adaptadas para o nosso instrumento. As afirmativas sobre modelos atômicos foram formuladas a partir de um artigo (Petri e Niedderer, 1998) em que os autores estudam como o processo de aprendizagem, em Física Atômica, de um único estudante, é influenciado por diferentes concepções do átomo simultaneamente compartilhadas por ele. As restantes foram especialmente elaboradas para esta parte do instrumento.

Resultados da aplicação do instrumento antes da discussão da unidade conceitual

A análise da aplicação do instrumento antes e depois da unidade conceitual foi organizada em três partes, segundo a própria estrutura do instrumento. As respostas às questões abertas foram organizadas em categorias, mostradas abaixo, seguidas de alguns exemplos de respostas dadas pelos professores-alunos, quando pertinentes. (O número após cada categoria refere-se ao número de alunos na respectiva categoria).

Questão 1

Nesta questão, os seguintes fatos históricos eram esperados como resposta correta: o problema da radiação do corpo negro, a descoberta do efeito fotoelétrico, os resultados negativos do experimento de Michelson e Morley e o movimento browniano.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 2

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 7

Exemplo: *Efeito fotoelétrico – metais bombardeados com luz emitem fótons e se esta mesma luz fosse usada sobre outro metal, este poderia não ser capaz de emitir fótons, mesmo que aumentasse a intensidade da luz incidente, era necessário trocar a luz incidente. A energia não era emitida na forma contínua e sim em quantidades ou múltiplos definidos. Princípio da Incerteza, no qual é admitido a incapacidade de determinar com precisão e simultaneamente 2 grandezas que caracterizam uma partícula*

Categoria 3 – cita e comenta de forma correta 3 fatos: 1

Exemplo: *Radiação de corpo negro – acreditava-se que um corpo negro emitia radiação continuamente, ou seja, seu espectro de radiação incluía todas as frequências, de zero a infinito, distribuídas de acordo com a temperatura absoluta do corpo. Esta descrição não concordava com o que era observado. Efeito fotoelétrico – a descrição da luz como onda EM não concordava com o que se observava, especialmente o fato de a energia cinética dos elétrons liberados não depender da intensidade do feixe luminoso. Velocidade da luz no vácuo – a velocidade da luz medida em qualquer situação era sempre a mesma, não importando se a fonte estava em movimento ou não.*

Categoria 4 – cita e comenta corretamente 2 fatos e erra/não responde o terceiro: 1

Exemplo: *Radiação de corpo negro – não pode ser explicada pelo EM. Modelo atômico – os elétrons deveriam espiralar rapidamente em direção ao núcleo. Efeito fotoelétrico – a intensidade luminosa não é responsável pelo mesmo, o que não era justificável pelo EM.*

Categoria 5 – cita e comenta 1 só fato corretamente, errando ou não respondendo os outros: 2

Exemplo: *Catástrofe do ultravioleta – Rayleigh e Jeans tentavam construir a fórmula da curva de temperatura (radiação do corpo negro). A Mecânica Clássica não admitia essa construção. Quando chegava na região do ultravioleta, explodia ao infinito a curva.*

Categoria 6 – cita só 1 fato corretamente, mas sem comentá-lo, ou o comenta erradamente: 4

Exemplo: *a descoberta dos raios X (final do século XIX); e efeito fotoelétrico (1905) e a experiência de Millikan com gotas de óleo.*

Categoria 7 – cita 2 fatos corretamente, sem comentá-los, ou os comenta erradamente: 1

É notável que apenas um dos 18 alunos tenha citado e comentado corretamente três fatos que constituíam anomalias sérias a ponto de provocar uma crise na Física Clássica, enquanto que a maioria (7) respondeu tudo erradamente ou de forma confusa, apesar de já terem realizado disciplinas de introdução à MQ. Portanto, a quase totalidade dos professores-alunos desconhecia fatos históricos supostamente bem difundidos. Pudemos também identificar uma idéia central compartilhada por alunos que não responderam corretamente à questão: confusão entre elaborações teóricas, que se configuram como articulação de um novo paradigma, com fatos que constituem anomalias para o paradigma estabelecido (por exemplo, a hipótese de de Broglie sobre a natureza dual da matéria, ou o postulado da invariância da velocidade da luz no vácuo).

Questão 2

Obviamente, esta é uma questão muito ampla e que dá margem a várias possíveis respostas corretas. Mas esperávamos, ao menos, que os alunos tivessem a clareza de que há uma teoria para descrever objetos macroscópicos (Física Clássica) e outra para descrever os objetos microscópicos (Mecânica Quântica). Outro ponto crucial esperado era a questão determinismo *versus* indeterminismo.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 3

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 7

Exemplo: *Sim, com a Física quântica temos a inserção da dependência da massa e energia em função da velocidade das partículas; num ambiente em que espaço é função do tempo.*

Categoria 3: Respondeu corretamente: 5

Exemplo: *Sim, na física clássica, probabilidade só é aplicada a um número grande de estados (como na termodinâmica). Já na física quântica, mesmo uma partícula individualmente é tratada de maneira probabilística.*

Categoria 4 – não vê distinções entre MQ e MC: 1

Categoria 5 – resposta parcialmente correta: 2

Exemplo: *Sim, existe diferença essencial, pois na mecânica clássica trabalhamos com corpos macroscópicos, de baixa energia (movimento) e, por conseguinte, baixa velocidade. Já na física quântica, os corpos são microscópicos, com elevadas velocidades.*

Apenas 4 dos 18 alunos-professores mencionaram os dois pontos centrais mencionados como esperados nas respostas corretas (microscopia *versus* macroscopia; determinismo *versus* indeterminismo). Observou-se que, na categoria 2, como no exemplo transcrito, muitos mesclaram, de forma confusa, conceitos da MQ com conceitos da Relatividade Especial, deixando transparecer que concebem os objetos do mundo microscópico e quântico como automaticamente relativísticos. Pôde-se notar, também, a falta de clareza sobre os limites de validade da MQ e da Física Clássica (macroscopia *versus* microscopia).

Questão 3

Nesta questão, esperávamos que as seguintes propriedades essenciais de objetos clássicos fossem ao menos mencionadas: (a) que eles são objetos macroscópicos; (b) que eles possuem momentum linear e posição bem definidos simultaneamente, no caso do objeto ser uma partícula ou corpo material; e (c) que obedecem a equações de movimento determinísticas (leis de Newton no caso de partículas e equações de Maxwell no caso de ondas EM's); e (d) que eles são, sempre, ou partículas ou ondas.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 2

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 13

Exemplo: *São propriedades gravitacionais e elásticas. Gravitacionais: peso, energia potencial. Elásticas: forças de contato em geral, força elástica, energia de deformação.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: 1

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 2

Exemplo: *Massa, força, energia (contínua), tempo sendo absoluto, campos gravitacional, elétrico e magnético; partículas como partículas.*

Pudemos identificar as seguintes idéias compartilhadas pelos alunos que não conseguiram responder corretamente à questão, antes da aplicação da unidade conceitual: (a) as leis de conservação (da energia e do momentum linear) só se aplicam à Física Clássica; (b) a associação de atributos físicos a objetos clássicos que são, também, propriedades de objetos quânticos (a massa, por exemplo); e (c) os objetos clássicos possuem sempre pequenas velocidades, ou seja, pensam que um objeto quântico deve ser sempre relativístico.

Questão 4

Aqui esperávamos que as respostas mencionassem: (a) são objetos do mundo microscópico; (b) são objetos para os quais o momentum linear e a posição são observáveis complementares, ou seja, não estão bem definidos simultaneamente; (c) seu movimento no espaço não obedece uma equação de movimento determinística, como no caso dos objetos clássicos; e (d) são objetos com um caráter dual, isto é, em determinadas situações se comportam como partículas, e, em outras, como ondas.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 2

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 9

Exemplo: *Devem estar com velocidades que alterem seus eventos de tempo e comprimento. Não se tem certezas, mas apenas probabilidades.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: 3

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 4

Exemplo: *A quantização da energia, momentum, velocidade da luz como sendo absoluta; algumas "partículas" funcionando ou como onda ou como partícula.*

Identificamos aqui três idéias compartilhadas: (a) novamente, que os objetos quânticos estão, necessariamente, em movimento relativístico; (b) a associação da natureza probabilística de objetos quânticos com a impossibilidade dele ser observável diretamente; e (c) os objetos quânticos possuem, necessariamente, propriedades físicas discretas.

Questão 5

Esperávamos que os alunos mencionassem, pelo menos, as seguintes características: (a) o tamanho do objeto (macroscopia *versus* microscopia); (b) os objetos clássicos não obedecem ao Princípio da Incerteza; (c) não existe dualidade onda-partícula para os objetos clássicos, ao contrário dos quânticos; e (d) o comportamento dos objetos clássicos é determinístico, enquanto o dos quânticos é probabilístico.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 3

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 9

Exemplo: *A principal diferença é que os objetos clássicos claramente podem ser descritos por modelos matemáticos, enquanto que a física quântica não nos permite o mesmo.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: 3

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 3

Exemplo: *No clássico, temos certezas; no quântico, incertezas.*

Aqui a grande maioria dos alunos-professores sequer conseguiu elaborar uma resposta sobre o que foi perguntado. Percebe-se que a maioria dos alunos não consegue verbalizar ou elaborar as diferenças contrastantes entre os objetos clássicos e os quânticos. Por exemplo, quando respondem, simplesmente, “massa”. Pôde-se ainda notar que uma idéia central é compartilhada por vários alunos que não conseguiram responder corretamente a esta questão, a de que os objetos quânticos são sempre relativísticos, enquanto que os clássicos, não. Provavelmente isso se deva ao relativo descaso do ensino tradicional com essas questões mais conceituais, reforçado pelo uso freqüente de analogias semiclássicas na abordagem inicial da MQ em tais cursos.

Questão 6

Nesta questão, o esperado era que o aluno, ao menos, respondesse com uma frase clichê do tipo “É o quantum de uma onda eletromagnética”.

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 1

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 6

Exemplo: *partículas que viajam em “pacotes” e emitem energia.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: 8

Exemplo: *Quantum de luz.*

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 3

Exemplo: *Trata-se uma partícula resultante de uma colisão. Por ex., quando um elétron passa de um nível atômico para outro nível mais externo, ele perde energia. No entanto, ao retornar ao nível atômico anterior, ele emite luz, o que está diretamente relacionado com o fóton.*

Esta questão foi a de maior índice de acertos, o que não é surpreendentemente, pois é possível respondê-la usando frases prontas e curtas, tipo clichês (veja o exemplo apresentado acima). Nenhuma das respostas, porém, fez menção à natureza quântica do fóton. Identificaram-se duas idéias compartilhadas pelos alunos que não responderam corretamente: (a) que o fóton só existe nas transições atômicas e (b) que o fóton é uma “concentração de energia” que só existe na frente da onda.

Na segunda parte do instrumento (11 questões objetivas), a média de acertos dos professores-alunos ficou em 6,6 antes das aulas. As questões OB01 (sobre efeito fotoelétrico), OB10 (princípio da incerteza) e OB11 (emissão atômica) foram as de menor acerto, enquanto as questões OB4 (reações nucleares) e OB5 (afirmativas sobre Física Quântica) foram as que tiveram maior índice de acertos. É notável que uma questão sobre efeito fotoelétrico esteja entre as de menor freqüência de respostas corretas, por se tratar de um assunto tradicionalmente explorado nos concursos de vestibular e abordado nos cursos preparatórios para este tipo de concurso.

Na última parte (20 afirmativas com escala Likert), para um máximo de 100 pontos, a média no pré-teste foi de 72,8. A questão L8 (“Quando um elétron ‘salta’ de um determinado orbital para outro de energia mais baixa, emitindo um fóton, ele não se encontra em um estado com energia bem definida”), foi a de menor acerto. Esse resultado, de certa maneira, era esperado, dado que a questão L8 se refere a um assunto muito pouco abordado nos cursos tradicionais e sequer mencionado em livros de divulgação científica. A questão de maior índice de acertos foi a L5 (“A luz sempre se comporta como uma onda”), o que revela que, de alguma forma, eles já possuíam a informação sobre o caráter dual da luz.

Neste trabalho, concentramos-nos apenas na análise das respostas à primeira parte do instrumento (questões abertas) porque as perguntas propostas, nesta parte, são de natureza conceitual e, portanto, referem-se ao foco da abordagem utilizada na unidade didática. Acerca da segunda e da terceira partes do instrumento, apresentamos um simples relato dos resultados, sem uma discussão detalhada dos mesmos. Uma análise mais aprofundada dessas partes do instrumento mereceria ser objeto de um outro trabalho, inclusive utilizando-se turmas de controle, expostas a uma carga horária equivalente, em uma “abordagem tradicional”.

Descrição da unidade didática conceitual

A disciplina foi desenvolvida num total de 16 encontros de manhã inteira, em semestre letivo normal e estruturada em três unidades: primeiro a *unidade conceitual* (objeto de interesse deste artigo), uma segunda *unidade formal* e uma terceira *unidade de aplicações*. A unidade conceitual foi ministrada ao longo de seis encontros de uma manhã inteira, com a participação dos autores deste artigo.

Na primeira metade da primeira manhã, aplicou-se o pré-teste de levantamento de noções básicas sobre Mecânica Quântica (Ostermann e Ricci 2003). Na metade seguinte desta manhã e na segunda manhã, apresentou-se uma introdução histórica sobre a gênese e formulação da MQ, onde foram comentados alguns fatos tais como: as origens da teoria quântica; radiação do corpo negro; efeito fotoelétrico; a hipótese de Planck; Einstein e o quantum de luz; modelos atômicos semiclássicos de Rutherford e de Bohr; os postulados de Bohr e o espectro do hidrogênio; o experimento de Compton e a realidade do fóton; de Broglie e a dualidade onda-partícula; o fracasso da “velha teoria quântica”; Schrödinger e a Mecânica Ondulatória; Max Born e a interpretação probabilística da Mecânica Ondulatória; o Princípio da Incerteza de Heisenberg; o debate Bohr-Einstein e a formulação da doutrina de Copenhague; o Princípio da Exclusão de Pauli e o spin do elétron.

Na terceira manhã, inicialmente foi realizada uma discussão dos conceitos mais básicos envolvidos na descrição clássica e na descrição quântica da natureza, especialmente no que se refere às propriedades dinâmicas de objetos clássicos e de objetos quânticos. Os fótons e os elétrons foram abordados, desde o início, como protótipos de objetos quânticos elementares, não-massivos e massivos, respectivamente. Com base nestes objetos quânticos elementares mais conhecidos, diversos aspectos conceituais básicos da MQ foram introduzidos e exemplificados, tais como a função de onda e a densidade de probabilidade quântica correspondente, a interpretação de Copenhague para o módulo ao quadrado da função de onda, o Princípio da Superposição Linear de estados e o Princípio da Incerteza. Procurou-se deixar claro para o aluno, desde o início, que existem várias versões (“pictures”) da MQ, e que o curso aborda tão somente a versão de Schrödinger, ou seja, a Mecânica Ondulatória. Essa escolha justifica a utilização da Ótica Ondulatória como uma espécie de “porta de entrada” para a MQ, ao invés de, como tradicionalmente é feito, usar a Mecânica Clássica para desempenhar esta função. Cremos que a discussão de modelos semiclássicos,

como feito na abordagem tradicional, dificulta, muitas vezes, a aprendizagem significativa de conceitos quânticos sem análogos mecânico-clássicos. Preferiu-se, então, realizar uma revisão da Ótica Ondulatória partindo-se do experimento de Young da fenda dupla, depois caracterizando-se a luz como uma onda eletromagnética, seguindo-se uma discussão sobre interferência, difração e polarização de ondas eletromagnéticas, finalizando-se com a explicação do funcionamento detalhado do interferômetro de Mach-Zehnder sob o ponto de vista clássico. Em seguida, discutiu-se mais detalhadamente vários aspectos e fenômenos envolvendo os protótipos escolhidos para objetos quânticos (fótons e elétrons). Começando com fótons, partiu-se da teoria de Einstein para explicar o efeito fotoelétrico, discutiu-se a dualidade onda-partícula e o experimento de Compton, o regime quântico (monofotônico) para feixes luminosos, culminando com a explicação do funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder sob o ponto de vista quântico.

Na quarta manhã, realizaram-se algumas atividades didáticas sobre interferência, baseadas no artigo de Cavalcante e Tavolaro (2001). Nessas atividades, alguns alunos apresentaram também equipamentos de baixo custo desenvolvidos e/ou usados em suas escolas para ilustrar os fenômenos.

Na quinta manhã, fez-se inicialmente uma rápida apresentação de um *software* que simula o funcionamento do interferômetro de Mach-Zehnder, a fim de que os alunos tivessem elementos para poder compreender o funcionamento do aparelho. Essa discussão teórica foi articulada a uma atividade virtual exploratória utilizando um *software* livre, tipo “bancada virtual”, sobre o interferômetro de Mach-Zehnder (obtido em www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/interfer/interfere.html). Esse *software* permite ao usuário confrontar os regimes clássico e quântico da luz e mostrou ser uma ferramenta didática muito potente para a aprendizagem dos conceitos básicos de MQ envolvidos. No restante da manhã, então, foi desenvolvida uma atividade virtual com o *software* do interferômetro, utilizando-se um roteiro exploratório elaborado pelos autores deste artigo, com os alunos divididos em duplas, cada qual operando em um microcomputador.

Finalmente, na sexta manhã do módulo conceitual foi apresentado um *software* livre (obtido em www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/Doppelspalt/dslit.html), também do tipo “bancada virtual”, que simula o experimento da fenda dupla realizado com feixes de partículas. Esse *software* permite ao usuário realizar virtualmente o experimento tanto com feixes de elétrons como com apenas um elétron incidindo de cada vez no aparato, e revelou-se, como no caso do *software* citado na parágrafo anterior, extremamente útil para o processo ensino-aprendizagem de conceitos básicos de MQ. Nesta atividade virtual, os alunos também usaram um roteiro exploratório elaborado pelos autores, nos moldes do outro citado anteriormente. Na parte final da manhã, com a finalidade de integrar vários dos tópicos abordados, apresentou-se um experimento de pensamento em que o arranjo da fenda dupla com feixe de elétrons é, imaginariamente, colocado dentro de uma câmara de neblina de Wilson. Com o arranjo, mostrou-se como o princípio da incerteza impede que se descubra por qual das fendas passa cada elétron e, ao mesmo tempo, consiga-se observar na tela o padrão de interferência.

Ainda como parte da unidade conceitual, foram promovidas discussões de listas de questões sobre o conteúdo desenvolvido, e foi sugerida a leitura do livro *Alice no país do quantum*, de autoria do físico Robert Gilmore (Rio de Janeiro, Jorge Zahar Editor, 1998), obra em prosa que aborda vários dos aspectos conceituais da MQ tratados nessa unidade.

Ao final da realização da unidade, vários dos professores-alunos se manifestaram muito favoravelmente quanto às atividades virtuais desenvolvidas no curso, inclusive sugerindo que, numa próxima aplicação da unidade, essas atividades fossem contempladas com mais tempo para sua realização. Isso parece indicar, por si só, a grande relevância deste tipo de atividade e é nossa intenção, de fato, implementar essa sugestão na próxima versão da unidade didática conceitual, no segundo semestre de 2003.

Resultados obtidos com a implementação da unidade conceitual

Na aplicação do teste após o término do curso, a primeira parte do instrumento de avaliação apresentou os seguintes resultados:

Questão 1

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: **0**

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **1**

Exemplo: *Dualidade onda-partícula; princípio da incerteza; substituição do conceito de órbita pelo de orbital na estrutura do átomo.*

Categoria 3 – cita e comenta de forma correta 3 fatos: **1**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico – resultados experimentais eram contraditórios com a teoria ondulatória da luz; Radiação de corpo negro – considerando que um corpo a uma temperatura absoluta T irradia uma quantidade de energia com frequências contínuas levava a uma conclusão não plausível: que a intensidade da radiação crescia ao infinito com a frequência; em quaisquer circunstâncias, a velocidade da luz era a mesma.*

Categoria 4 – cita e comenta corretamente 2 fatos e erra/não responde ao terceiro: **2**

Exemplo: *Radiação de corpo negro: Planck introduziu o conceito de quantização de energia; Efeito Compton: onde percebe-se o caráter corpuscular da radiação; Efeito fotoelétrico: observação do caráter corpuscular da radiação.*

Categoria 5 – cita e comenta 1 só fato corretamente, errando ou não respondendo os outros: **3**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico: emissão de elétrons de uma superfície de metal devido à incidência de luz; Efeito Compton: espalhamento do elétron devido à incidência de luz (fóton); Interferência de elétron: dualidade onda-partícula.*

Categoria 6 – cita só 1 fato corretamente, mas sem comentá-lo, ou o comenta erradamente: **7**

Exemplo: *Efeito Compton; Efeito fotoelétrico; Experimento de Young; Estrutura fina do espectro de hidrogênio.*

Categoria 7 – cita 2 fatos corretamente, sem comentá-los, ou os comenta erradamente: **3**

Categoria 8 – cita 3 fatos corretamente sem comentá-los: **1**

Exemplo: *Efeito fotoelétrico; radiação de corpo negro; movimento browniano.*

Foi preciso criar uma nova categoria de respostas (categoria 8) a essa questão, a fim de dar conta de todas as novas respostas obtidas da pós-aplicação do teste. Não houve melhora significativa nas respostas, mas isso não é surpreendente, uma vez que na unidade didática não se adotou uma abordagem histórica. Ainda se pôde observar alguns alunos confundindo fatos experimentais que constituíram anomalias no âmbito do paradigma vigente com elaborações teóricas que são, na realidade, parte da articulação de um novo paradigma, embora num número bem menor do que antes da aplicação da unidade didática conceitual.

Questão 2

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: **0**

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **1**

Exemplo: *Existem, e muitas delas são de difícil compreensão como, por exemplo, um fóton que não possui massa, mas apresenta energia.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: **14**

Exemplo: *Sim. A física clássica é determinista enquanto que a física quântica é indeterminista (probabilística). Observam-se fenômenos no mundo microscópico que não podem ser explicados pelas teorias clássicas, como o efeito fotoelétrico. Na física clássica, grandezas como posição e momentum são bem definidos, enquanto que na MQ essas grandezas não comutam, isto é, não podemos definir com precisão posição e momentum simultaneamente*

Categoria 4 – não vê distinções entre MQ e MC: **0**

Categoria 5 – resposta parcialmente correta: **3**

Exemplo: *Sim. Usando luz e emissão de fótons com uso de interferência, é possível mostrar que há diferença entre física clássica e física quântica.*

Observou-se uma significativa melhora nas respostas formuladas para esta pergunta. O número de alunos que deram respostas completas e corretas aumentou de 5 para 14. Nenhum aluno deixou de responder à questão, enquanto no pré-teste três não responderam nada; um exemplo é o de um aluno que, tendo nada respondido antes da unidade didática, formulou a resposta transcrita na categoria 2 acima. Nenhum aluno confundiu a MQ com a Relatividade Especial e grande parte das respostas revelou que os alunos adquiriram uma clareza sobre os limites de validade da Física Clássica.

Questão 3

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: **0**

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **4**

Exemplo: *Possuem sempre massas. Podem ser distinguidos entre si.*

Categoria 3 – respondeu corretamente: **8**

Exemplo: *Os objetos clássicos possuem atributos de posição e momentum bem definidos. Podem ser observados por suas trajetórias.*

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 6

Exemplo: *Podem ser estudados como partículas. Têm, ao mesmo tempo, posição e momentum bem definidos.*

O número de respostas completamente erradas ou confusas caiu de 14 para 4, ao passo que na categoria de respostas corretas o número subiu de 1 para 8, o que revela, sem dúvida, uma significativa melhora de conhecimento dos alunos. Nenhum aluno revelou pensar que os princípios de conservação só se aplicam ao mundo clássico, ou confundiu a MQ com a Relatividade Especial. Mas houve alguns alunos que ainda não conseguiram caracterizar a essência dos objetos clássicos, como no exemplo dado acima na categoria 2.

Questão 4

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 0

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 2

Exemplo: *Massa, energia e a função de onda ao quadrado (probabilidade de encontrar uma partícula).*

Categoria 3 – respondeu corretamente: 10

Exemplo: *Dualidade e indistinguibilidade. Um objeto quântico pode apresentar comportamento corpuscular ou ondulatório.*

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 6

Exemplo: *Interferência, pequenas dimensões, grandes velocidades (próximas à da luz), incerteza na posição e na velocidade.*

Houve uma significativa melhora nas respostas: na categoria 2 (respostas completamente erradas ou confusas), o número baixou de 9 para 2, enquanto na categoria 3 (respostas corretas) o número subiu de 3 para 10. Nestas, o caráter indeterminístico ou probabilístico dos objetos quânticos teve 5 citações; o Princípio da Incerteza e o fato de existirem observáveis que não comutam entre si receberam 4 citações cada um; a dualidade onda-partícula teve 2 citações. Alguns alunos persistiram em citar a massa como uma propriedade física que distingue essencialmente objetos clássicos dos quânticos, como no exemplo da categoria 2, dado acima. Dois alunos ainda fizeram confusão entre a MQ e a Relatividade Especial.

Questão 5

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: 1

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: 1

Categoria 3 – respondeu corretamente: 14

Exemplo: *Objetos quânticos, ao contrário dos clássicos, são probabilísticos, além de possuírem propriedades incompatíveis.*

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: 2

Exemplo: *A principal diferença é poderem ou não ser distinguidos entre si e o princípio da incerteza para os objetos quânticos.*

Aqui houve também uma melhora significativa no número de respostas completamente corretas, que subiu de 3 para 14, ao mesmo tempo em que as respostas completamente erradas ou confusas baixou de 9 para 1. No conjunto das respostas corretas (categoria 3), as propriedades mais citadas foram: objetos clássicos não satisfazem o Princípio da Incerteza, enquanto que os quânticos, sim (8 citações); o comportamento dos objetos clássicos é determinístico, enquanto o dos quânticos é indeterminístico (5 citações); os objetos clássicos idênticos são, em princípio, distinguíveis entre si, ao contrário dos quânticos (3 citações); e os objetos quânticos apresentam natureza dual, enquanto os clássicos não (2 citações).

Questão 6

Categoria 1 – não respondeu/não lembra: **0**

Categoria 2 – respondeu tudo erradamente ou de forma confusa: **0**

Categoria 3 – respondeu corretamente: **15**

Exemplo: *Quantum de luz; pacote de energia; energia emitida quando o elétron salta de um nível de energia para outro mais baixo.*

Categoria 4 – resposta parcialmente incorreta ou imprecisa: **3**

Exemplo: *É uma partícula de massa de repouso nula que apresenta uma função de onda associada.*

O número de alunos na categoria 2 (respostas completamente erradas ou confusas), caiu de 7 para zero, enquanto na categoria 3 (respostas corretas), subiu de 8 para 15. Nessas corretas, 7 alunos definiram o fóton como “pacotes discretos de energia” emitidos durante transições eletrônicas em átomos e 4 o definiram com a resposta-clichê “quantum de luz”. Pela primeira vez, apareceram aqui respostas que revelam uma compreensão maior da natureza quântica do fóton do que uma mera resposta do tipo clichê. Como, por exemplo, quando o aluno responde invocando o comportamento dual do fóton ou o fato de que ele é um objeto quântico, sendo descrito por uma função de onda capaz de “interferir consigo mesmo”.

De maneira geral, os resultados acima revelam que, de fato, houve uma melhora significativa nas respostas dadas na primeira parte do pós-teste: o número de professores-alunos que simplesmente não responderam caiu para zero em quase todas as questões (exceção para a quinta questão, onde ainda houve uma pessoa que não a respondeu); o número de respostas completas e corretas subiu significativamente em algumas das questões, chegando a aumentar em mais de quatro vezes; e o mesmo ocorreu também com as respostas parcialmente corretas. Acreditamos que essa melhoria possa ser atribuída especificamente à implementação de uma unidade conceitual, pois, em cursos tradicionais, aspectos cruciais para o entendimento da MQ são discutidos apenas superficialmente. Na segunda parte do instrumento (11 questões objetivas), a média de acertos subiu de 6,6 no pré-teste para 8,4 no pós-teste. A questão OB1 continuou sendo a que teve média mais baixa. A questão OB10, sobre o princípio da incerteza, passou a ser uma das com maior número de acertos no pós-teste, enquanto que no pré-teste ela estava entre as que tinham menor índice de acertos, juntamente com a questão OB9 (sobre o princípio da exclusão de Pauli). Na última parte (20 afirmativas com escala Likert), a média subiu de 72,8 no pré-teste para 79,9 pontos no pós-teste. A questão L19 (sobre o princípio da incerteza aplicado a modelos atômicos) teve a menor média, e a L4 (sobre o caráter corpuscular do elétron), a mais alta.

Discussão dos resultados e algumas conclusões

Os resultados da aplicação do pré-teste em relação à primeira parte do instrumento revelaram que os professores-alunos apresentavam lacunas importantes em relação a aspectos conceituais de MQ, o que corroborou a idéia de construir uma unidade exclusivamente conceitual para o curso do MPEF. Observamos no pré-teste que algumas concepções alternativas eram compartilhadas por grupos de alunos. As principais encontradas foram: (a) que os objetos quânticos são necessariamente relativísticos; (b) falta de clareza sobre os limites de validade da MQ e da Física Clássica (macroscopia *versus* microscopia); (c) as leis de conservação (da energia e do momentum linear) só se aplicariam à Física Clássica; (d) associar atributos físicos aos objetos clássicos, os quais também são propriedades de objetos quânticos (a massa, principalmente); (e) a associar à natureza probabilística de objetos quânticos a impossibilidade dele ser observável diretamente; (f) que os objetos quânticos possuem, necessariamente, propriedades físicas discretas; e (g) que o fóton só existe nas transições atômicas. É interessante que resultados semelhantes foram também obtidos por Müller e Wiesner (2002) em entrevistas realizadas com os alunos de graduação e futuros professores de Ensino Médio. Por exemplo, a maior parte dos estudantes entrevistados pelos autores respondeu que uma propriedade essencial dos objetos clássicos é a massa, e revelaram que não consideram essa propriedade como característica de objetos quânticos. Um número significativo dos estudantes entrevistados pela dupla de pesquisadores revelou compartilhar a idéia de que objetos clássicos caracterizam-se, de um modo geral, por possuírem baixas velocidades, enquanto os quânticos são associados frequentemente a velocidades relativísticas. Por outro lado, 1/3 desses estudantes revelaram ter uma idéia clara sobre os limites de validade da Física Clássica, o que não ocorreu com nossos alunos-professores.

O pós-teste, em relação à mesma parte do instrumento, revelou ter havido uma significativa melhora na compreensão de aspectos conceituais básicos da MQ, o que era o objetivo principal que tínhamos em mente com a implementação de uma unidade didática conceitual. Muito poucos alunos (apenas 2) ainda revelaram associar objetos quânticos com movimento relativístico. A maioria dos alunos-professores revelou ser capaz de caracterizar os objetos quânticos e diferenciá-los dos clássicos, como, por exemplo: associando o determinismo aos objetos clássicos, e o caráter probabilístico aos quânticos; invocando o Princípio da Incerteza e a dualidade onda-partícula como aplicáveis apenas ao mundo quântico; ou considerando que os objetos clássicos idênticos são distinguíveis entre si, ao passo que os objetos quânticos idênticos não o são. Pela primeira vez, apareceram, na pergunta 6 sobre o fóton, respostas que revelaram uma compreensão maior sobre a natureza quântica do fóton do que uma mera resposta do tipo clichê, como aparecia com frequência nas respostas correspondentes anteriores à aplicação da unidade didática. Como, por exemplo, quando alunos responderam à questão invocando o comportamento dual do fóton ou o fato de que ele é um objeto quântico, sendo descrito por uma função de onda capaz de “interferir consigo mesmo”.

Um teste *t* mostrou que há diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,000$) nas respostas dos alunos antes e depois da unidade conceitual, tanto para as questões objetivas como nas do tipo Likert. Finalmente, ao cruzarmos as respostas das 11 questões objetivas com as das 20 afirmativas do tipo Likert, antes e depois da unidade conceitual, verificamos que há uma fraca correlação entre seus desempenhos nessas duas partes do instrumento. Ou seja, um bom desempenho em questões objetivas de vestibular não implica necessariamente um bom desempenho nas questões tipo Likert de forte conteúdo conceitual.

Em síntese, as respostas à primeira parte do pós-teste mostraram que houve mudanças nas concepções dos professores-alunos com a implementação da unidade didática conceitual sobre MQ, e que elas não ocorreram ao acaso, mas sim como consequência da abordagem conceitual relatada neste trabalho.

Referências

- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 18, n. 3, p. 298-316, dez. 2001.
- FISCHLER, H.; LICHTFELDT, M. Modern physics and students conceptions international. *Journal of Science Education*, Reno, v. 14, n. 2, p. 181-190, abr./jun. 1992.
- GIL PEREZ, D.; SENENT, F.; SOLBES, J. Analisis critico de la introducción de la física moderna de la enseñanza media. *Revista de Enseñanza de la Física*, Córdoba, v. 2, n. 1, p. 16-21, 1988.
- GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A.; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.
- IRESO, G. The quantum understanding of pre-university physics students. *Physics Education*, London, v. 35, n. 1, p. 15-21, 2000.
- JONES, D. G. C. Teaching moderns physics: misconceptions of the photon that can damage understanding. *Physics Education*, London, v. 26, n. 2, p. 93-98, mar. 1991.
- JOHNSTON, I. D.; CRAWFORD, K.; FLETCHER, P. R. Student difficulties in learning quantum mechanics. *International Journal of Science Education*, London, v. 20, n. 4, p. 427-446, apr./may 1998.
- 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. 1-20, ago. 2002.
- MÜLLER, R.; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. *American Journal of Physics*, New York, v. 70, n. 3, p. 200-209, mar. 2002.
- OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Noções básicas de mecânica quântica: um levantamento junto a professores de física de ensino médio. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15., 2003, Curitiba. *Anais..* Curitiba, 2003.
- PESSOA JUNIOR, O. Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 27-48, mar. 1997.
- PETTRI, J.; NIEDDERER, H. A learning pathway in high-school level quantum atomic physics. *International Journal of Science Education*, London, v. 20, n. 9, p. 1075-1088, nov. 1998.
- PINTO, A. C.; ZANETIC, J. É possível levar a física quântica para o ensino médio? *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 7-34, abr. 1999.
- SCARANI, V.; SUAREZ, A. Introducing quantum mechanics: one particle interferences. *American Journal of Physics*, New York, v. 66, n. 8, p. 718-721, aug. 1998.
- SOLBES, J. et al. Errores conceptuales en los modelos atómicos cuánticos. *Investigación y Experiencias didácticas*, Barcelona, v. 5, n. 3, p. 189-195, 1987.
- STEFANEL, A. Una experiencia en el marco de la introducción de la física cuántica en la escuela secundaria. *Revista de Enseñanza de la Física*, Córdoba, v. 11, n. 2, p. 35-44, 1999.

**Artigo recebido em dezembro de 2003 e
selecionado para publicação em maio de 2004.**

Apêndice: Teste sobre noções básicas de Mecânica Quântica

Primeira parte: *questões abertas extraídas ou adaptadas de artigos de pesquisa.*

- 1) Por volta de 1860, os físicos acreditavam que a física havia atingido o máximo grau de desenvolvimento e que só seriam possíveis pequenas alterações e avanços secundários. Porém no início do século XX descobriu-se uma série de fatos que não podiam ser explicados pela física clássica, e que provocaram uma crise que se traduziu no surgimento de um novo paradigma teórico (a física moderna e contemporânea). Cite e comente, no mínimo, três desses fatos. (Gil Pérez e outros, 1988)
- 2) Na sua opinião, existe diferença essencial entre as visões de mundo proporcionadas pela física clássica e pela física quântica? Justifique sua resposta. (idem)
- 3) Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos clássicos? (Müller e Wiesner, 2002)
- 4) Na sua opinião, quais são as propriedades essenciais dos objetos quânticos? (idem)
- 5) Na sua opinião, qual é a principal diferença entre objetos clássicos e objetos quânticos? (ibidem)
- 6) O que você entende por “fóton”? (ib.)

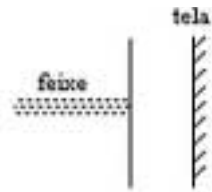
Segunda parte: *questões objetivas baseadas em concursos vestibulares, Exame Nacional de Cursos (MEC) e artigos de pesquisa.*

- 1) As afirmativas abaixo referem-se ao efeito fotoelétrico (CV UEPA):
I – Quando se aumenta apenas a intensidade da luz na superfície fotoelétrica, o número de elétrons emitidos por unidade de tempo aumenta.
II – É necessária uma energia mínima dos fótons da luz incidente para arrancar elétrons do metal que constitui uma fotocélula.
III – O efeito fotoelétrico pode ser explicado satisfatoriamente com a adoção de um modelo corpuscular para a luz.
IV – Quanto maior o comprimento de onda da luz, tanto menor a energia do fóton.

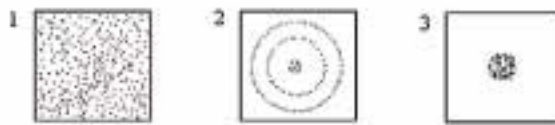
Pode-se afirmar que:

- (a) Apenas I e IV são verdadeiras.
 - (b) Todas são verdadeiras.
 - (c) As afirmativas I, II e III são verdadeiras.
 - (d) Apenas III e IV são verdadeiras.
 - (e) Todas são falsas.
-
- 2) A mecânica quântica trouxe novas idéias sobre o mundo subatômico. Em particular, permitiu uma melhor compreensão do conceito de dualidade onda-partícula, revelado (Exame Nacional de Cursos, 2000)
 - (a) na relação de Einstein de momentum-energia.
 - (b) na equação da força eletromagnética.
 - (c) na experiência de Wien do espectro da radiação do corpo negro.
 - (d) na difração de elétrons por um cristal.
 - (e) nos resultados experimentais do átomo de hélio.

- 3) Suponhamos que pudéssemos fazer um feixe de elétrons passar através de um orifício estreito, atrás do qual se encontra uma tela (constituída por uma chapa fotográfica). Indique qual a imagem que seria formada na tela, de acordo com a física moderna (Gil Pérez e outros, 1988).



- (a) A placa inteira aparece impressionada de forma regular (figura 1).
 (b) Aparecem zonas circulares concêntricas impressionadas e não-impressionadas (figura 2).
 (c) Aparece impressionada apenas a zona que fica diretamente atrás do orifício (figura 3).



- 4) Dentre as afirmações sobre reações nucleares apresentadas nas alternativas, qual está correta? (CV UFRGS)
- (a) Fusão nuclear e fissão nuclear são duas maneiras diferentes de denominar a mesma reação nuclear.
 (b) A fusão nuclear é um fenômeno comum que ocorre no dia-a-dia, podendo ser observada ao se derreter um pedaço de gelo.
 (c) A fissão nuclear, utilizada nas centrais nucleares, produz fragmentos radioativos.
 (d) No processo de fusão nuclear não há liberação de energia.
 (e) Uma reação nuclear em cadeia (seqüência de reações nucleares) não pode ser iniciada nem controlada em um reator nuclear.

- 5) Considere as duas colunas abaixo, colocando no espaço entre parênteses o número do enunciado da coluna de cima que mais relação tem com o da coluna de baixo (CV UFRGS).

- I – Existência do núcleo atômico.
 II – Determinação da carga do elétron.
 III – Caráter corpuscular da luz.
 IV – Caráter ondulatório das partículas.
- () Hipótese de de Broglie
 () Efeito fotoelétrico
 () Experimento de Millikan
 () Experimento de Rutherford

A relação numérica correta, de cima para baixo, na coluna dos parênteses, que estabelece a associação proposta, é:

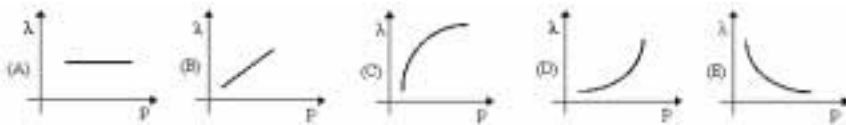
- (a) IV-III-II-I.
 (b) I-III-II-IV.
 (c) IV-II-III-I.
 (d) IV-III-I-II.
 (e) IV-I-II-III.

- 6) Considere as seguintes afirmações sobre a estrutura atômica (CV UFRGS):
- I – A energia de um elétron ligado a um átomo não pode assumir qualquer valor.
 - II – Para separar um elétron de um átomo é necessária uma energia bem maior do que para arrancar um próton do núcleo.
 - III – O volume do núcleo atômico é aproximadamente igual à metade do volume total do átomo.

Quais estão corretas?

- (a) Apenas a I.
- (b) Apenas a II.
- (c) Apenas a III.
- (d) Apenas a II e a III.
- (e) As três.

- 7) Qual dos gráficos abaixo melhor representa a relação entre o comprimento de onda da luz e a quantidade de movimento linear p dos fótons? (CV UFRGS)



- 8) Um átomo excitado emite energia, muitas vezes na forma de luz visível, porque (CV PUCRS)

- (a) um de seus elétrons foi arrancado do átomo.
- (b) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- (c) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo.
- (d) os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.
- (e) os elétrons se transformam em luz, segundo Einstein.

- 9) O princípio da exclusão de Pauli, além de essencial para a descrição da física atômica, possibilitou a compreensão do paramagnetismo, do comportamento dos elétrons em metais e de muitos fenômenos de baixas temperaturas. Esse princípio afirma que (Exame Nacional de Cursos, 2001):

- (a) Há partículas bosônicas, que formam os núcleos, e fermiônicas, que formam os elétrons.
- (b) Os elétrons ocupam um único nível de energia somente se o spin for inteiro.
- (c) Há níveis atômicos de energia que são preenchidos apenas com elétrons de spin positivo.
- (d) Mais de duas partículas de spin $\frac{1}{2}$, como o elétron, não podem ocupar um mesmo estado orbital ao mesmo tempo.
- (e) Os níveis atômicos são preenchidos com pares de elétrons de mesmo spin, que resultam ao final num spin positivo.

10) O princípio da incerteza (exame Nacional de Cursos, 2000):

- (a) não permite qualquer conhecimento da posição de uma partícula já que sua velocidade é sempre menor do que a da luz, mesmo na mecânica quântica.
- (b) traduz uma relação entre variáveis ditas conjugadas, de tal modo que uma maior definição no conhecimento de uma variável implica, necessariamente, uma maior ignorância de sua conjugada, sendo x a variável, p a sua conjugada, e Δx e Δp são as incertezas: $\Delta x \sim \frac{h \cdot \Delta p}{2\pi}$.
- (c) traduz uma relação entre variáveis ditas conjugadas, de tal modo que uma maior definição no conhecimento de uma variável implica, necessariamente, uma maior ignorância de sua conjugada, sendo x a variável, p a sua conjugada, e Δx e Δp são as incertezas: $\Delta x \sim \frac{h}{2\pi \cdot \Delta p}$.
- (d) traduz uma indefinição entre variáveis, de tal modo que uma maior definição no conhecimento do valor de uma implica, necessariamente, uma maior ignorância da outra, como, por exemplo, entre o momentum p e a energia E .
- (e) não permite qualquer conhecimento do balanço detalhado das partículas elementares, uma vez que o momentum e a energia são incertos e, portanto, nunca fazem parte de um conjunto de observáveis.

11) No decaimento de um átomo de um nível de energia excitado para um nível de energia mais baixo, ocorre a emissão simultânea de radiação eletromagnética. A esse respeito, considere as seguintes afirmações (CV UFRGS):

- I – A intensidade da radiação emitida é diretamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.
- II – A frequência da radiação emitida é diretamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.
- III – O comprimento de onda da radiação emitida é inversamente proporcional à diferença de energia entre os níveis inicial e final envolvidos.

Quais estão corretas?

- (a) Apenas a I.
- (b) Apenas a II.
- (c) Apenas a I e a III.
- (d) Apenas a II e a III.
- (e) As três.

Terceira parte: *questões de escala Likert. [OBS: inspiradas em Petri e Niedderer, 1998 (questões 15, 16, 17, 18, 19 e 20) e adaptadas de Ireson, 2000 (questões 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 e 14).]*

Com respeito às afirmativas abaixo, indique seu grau de concordância em relação a cada uma delas, assinalando CF (concordo fortemente), C (concordo), NO (não tenho opinião), D (discordo) e DF (discordo fortemente):

	CF	C	NO	D	DF
01. Leis de conservação tais como conservação da energia e conservação do momentum só se aplicam à física clássica.					
02. Nenhum processo físico, seja ele clássico ou quantum-relativístico, viola leis de conservação tais como a da carga elétrica, da energia e do momentum.					
03. As leis de conservação constituem verdadeiros pilares da física, no sentido de que são hierarquicamente mais gerais e se aplicam tanto à física clássica como à física moderna e contemporânea.					
04. O elétron sempre se comporta como uma partícula.					
05. A luz sempre se comporta como uma onda.					
06. O fóton é uma espécie de "corpúsculo de energia".					
07. Os elétrons, às vezes, se comportam como ondas.					
08. Quando um elétron "salta" de um determinado orbital para outro de energia mais baixa, emitindo um fóton, ele não se encontra em um estado com energia bem definida.					
09. É possível para um único fóton interferir construtiva e destrutivamente consigo mesmo.					
10. Elétrons são direcionados através de uma fenda muito estreita. Do outro lado, há um filme fotográfico. O que acontece é que os elétrons incidem no filme, um a um, e as marcas deixadas gradualmente formam um padrão de interferência.					
11. O eletromagnetismo de Maxwell e a mecânica newtoniana são incapazes de explicar porque os átomos são estáveis.					
12. Ninguém sabe precisamente a posição de um elétron ligado a um núcleo atômico, por ele ser muito pequeno e mover-se muito velocemente.					
13. Num átomo, os elétrons se movem aleatoriamente dentro de uma certa região em torno do núcleo.					
14. Quando os átomos emitem luz, os elétrons seguem uma trajetória bem definida ao passarem de um nível de energia para outro.					
15. O núcleo é rodeado por um "campo de probabilidade" dado pelo módulo ao quadrado da função de onda, $ \psi ^2$, e as órbitas eletrônicas do modelo de Bohr correspondem ao lugar geométrico onde $ \psi ^2$ possui seu valor máximo.					
16. Os elétrons são esferas minúsculas, carregadas negativamente, que se movem ao redor do núcleo em órbitas circulares ou elípticas bem definidas de acordo com sua energia (figura 1).					
17. A noção de elétron-partícula se movendo em uma órbita bem definida deve ser substituída pela noção de "nuvem eletrônica", cuja forma é a de $ \psi ^2$ para aquele valor de energia do elétron (figura 2).					
18. Por causa da dualidade onda-partícula, os elétrons são partículas que se movem em órbitas onduladas (figura 3).					
19. Por causa do princípio da incerteza de Heisenberg, as órbitas eletrônicas do modelo de Bohr correspondem, na realidade, a camadas difusas com uma certa espessura ao redor do núcleo, determinadas por $ \psi ^2$ (figura 4).					
20. Para uma dada energia, o elétron tem uma certa chance de estar se movendo em uma das possíveis órbitas confinadas a uma camada de certa espessura ao redor do núcleo. A chance dele estar ocupando uma determinada órbita da camada é determinada por $ \psi ^2$ (figura 5).					

