

O QUE ESTÃO ENTENDENDO ALUNOS UNIVERSITÁRIOS NAS AULAS DE MECÂNICA QUÂNTICA?

Ileana Maria Greca
Marco Antonio Moreira
Instituto de Física, UFRGS
Porto Alegre, RS

Resumo

O sucesso alcançado pela Mecânica Quântica na sua curta existência, medido tanto pela variedade de fenômenos que descreve e prediz como pelos seus impressionantes efeitos sobre a tecnologia moderna, torna recomendável seu estudo em diversas áreas e, ademais, que isto ocorra cada vez mais cedo. No entanto, para a maioria dos alunos de cursos de Ciências – onde é apresentada basicamente em disciplinas introdutórias de Física Geral - a Mecânica Quântica é mais uma barreira do que uma abertura a novas possibilidades. Este trabalho apresenta um estudo preliminar de algumas das dificuldades que alunos universitários parecem ter em relação a certos conceitos quânticos. Os resultados parecem confirmar que as duas abordagens que caracterizam tipicamente os cursos introdutórios de Mecânica Quântica - a fenomenológica "histórica" e a formal - têm escasso sucesso pois nenhum dos conceitos que consideramos fundamentais para a formação de modelos mentais sobre o mundo quântico (superposição de estados, princípio de incerteza, objetos quânticos e probabilidade) pareceria ser compreendido pela maioria dos estudantes pesquisados.

Introdução

A Mecânica Quântica, em parceria com a Relatividade é, sem dúvida, a grande estrela da Física do século vinte. Tendo suas raízes praticamente no início do século, vê agora, ao final do mesmo, desabrochar a era da tecnologia quântica. Concebida para explicar a física do microscópico, inspirou as teorias mais fundamentais dos sistemas elementares e avançou em áreas do macromundo.

Pode-se, sem hesitação, dizer que a Mecânica Quântica abriu uma nova e insuspeitada porta para a Ciência, que surpreendeu inclusive seus iniciadores e mudou o panorama da Física, não podendo ser simplesmente ignorada ou posta de lado como incômoda.

O sucesso alcançado pela Mecânica Quântica nos seus setenta anos de existência medido, tanto pela variedade de fenômenos que descreve e prediz - e que a Física Clássica é incapaz de explicar sequer em nível qualitativo - como pelos seus impressionantes efeitos sobre a tecnologia moderna, torna recomendável seu estudo em diversas áreas e, ademais, que isto ocorra cada vez mais cedo. Base de sustentação da física do estado sólido, da física molecular, atômica e nuclear, da física das partículas elementares e da luz, seus impactos práticos atingem, hoje, as mais variadas aplicações, relativas a sistemas de detecção, transmissão, registro, diagnose e outros, com importantes progressos em diversas áreas modernamente em desenvolvimento como as de comunicação e informação, e até mesmo na computação e na "criptografia" (Gershenfeld & Clamanq, 1998). Além de servir de fundamento para a Química e a Biologia, beneficia campos de praticidade imediata como as Ciências da Saúde e as Engenharias. E se, em alguma medida, muitas dessas áreas aplicadas

recebiam uma versão 'clássica' ou 'semiclássica' da Mecânica Quântica, pareceria que o divisor de águas da tecnologia do século XXI vai passar por uma versão 'quântica' da Mecânica Quântica. Com isto queremos dizer que se até agora os engenheiros elétricos só precisavam saber da existência de estados discretos de energia para entender os semicondutores, sem conhecer como eles surgiam, isto não vai ser mais suficiente. Por exemplo, em áreas como a computação tanto engenheiros como programadores possivelmente vão ter que pensar em propriedades quânticas como a superposição de estados e a não localidade para o desenvolvimento de sistemas de computação mais potentes.

Por isso, seu estudo em nível mais aprofundado (e não tão somente de "regras" ou de algoritmos de resolução) deveria ser quase uma exigência nos cursos iniciais das carreiras universitárias ditas científicas¹. No entanto, para a maioria dos alunos de cursos de Ciências – onde é apresentada basicamente em disciplinas introdutórias de Física Geral - a Mecânica Quântica é mais uma barreira do que uma abertura a novas possibilidades.

De um lado, a maioria dos livros adotados nesta fase e grande parte das súmulas das disciplinas onde é ministrada, continuam a abordar somente experiências e "gedanken experiments" (ainda que geniais) apresentados nos primórdios da Mecânica Quântica, partindo depois para o enfoque axiomático. A pesar de muito disto ser feito na pressuposição de que o estudante venha a adquirir familiaridade com a nova fenomenologia, os alunos não a incorporam como elementos da "sua" realidade. A insistência nesta abordagem, onde inclusive a denominada "velha teoria" ocupa seguidamente importante espaço, carece de justificativa, visto que o sucesso destes esforços se revela escasso. Por outra parte, são poucas as pesquisas na área de ensino de ciências (Johnston & al., 1998) com o objetivo de detectar dificuldades de compreensão de conceitos quânticos, embora estes sejam considerados difíceis não só por alunos de Engenharia ou Química, senão, também, pelos próprios alunos de cursos de Física. Destes trabalhos se destacam os do grupo de Berlin (Fischler & Lichtfeldt, 1992; Petri & Niedderer, 1998) dedicados basicamente a entender como os alunos compreendem a estabilidade do átomo; o trabalho de Johnston et al. (1998) discutindo a questão da dualidade onda partícula e de como as idéias clássicas que os alunos têm sobre onda e sobre partícula podem impedir a compreensão do conceito de dualidade na Mecânica Quântica; e as pesquisas do grupo da Universidade de Maryland sobre como as dificuldades dos alunos com os diagramas de energia e com o conceito de probabilidade na Mecânica Clássica dificultam a compreensão das mesmas questões na Mecânica Quântica (Redish, Bao & Jolly, 1997).

É por isso que iniciamos um projeto de pesquisa para detectar dificuldades dos estudantes com alguns dos conceitos quânticos e desenvolver, a partir disto, uma proposta didática (Greca & Herscovitz, 1998). Neste trabalho apresentamos resultados preliminares sobre as dificuldades dos alunos com alguns conceitos quânticos.

Fundamentação teórica

Nossa pesquisa baseia-se na teoria dos modelos mentais de Johnson-Laird (1983). Para ele, quando tentamos entender o mundo construímos representações mentais que são análogos estruturais com estados de coisas ou situações do mundo externo. Por isso o cerne da compreensão esta na criação destes modelos de trabalho – criados tanto a partir da percepção

¹ Merzbacher (1990), aliás, defende a tese de que a Mecânica Quântica deve permear os cursos de Física Geral das referidas carreiras, de forma não dissociada.

quanto do discurso – modelos com os quais é possível explicar situações ou prever o comportamento de sistemas. Para que os alunos sejam capazes então de entender os modelos físicos que lhes são apresentados nas aulas de ciências deveriam construir modelos mentais desses modelos físicos. Não entanto, parece que isto não acontece na maioria das vezes. A dificuldade para formar modelos mentais cujos resultados, explicações e previsões, sejam coincidentes com os cientificamente aceitos – ou seja que as explicações e previsões que os alunos possam formular a partir desses modelos mentais coincidam com as explicações e as previsões cientificamente aceitas – leva aos alunos a trabalhar com fórmulas e definições de forma mecânica, sem compreensão do que elas significam.

Pareceria ser que essas dificuldades estão às vezes relacionadas com certas dificuldades estruturais que conformando os ‘núcleos’ dos modelos mentais direcionam a sua formação (Greca & Moreira, 1998). Assim, por exemplo, pareceria que os alunos tendem a impor relações causais para os distintos eventos, não conseguindo, portanto, construir modelos mentais do conceito de força onde esta seja entendida como interação. Sendo o conceito de interação central para a compreensão da Mecânica Clássica, esta impossibilidade leva os alunos a não construir os modelos mentais adequados, de forma que usam os modelos que já possuem para explicar o mundo fora das aulas de ciências e utilizam fórmulas e definições de forma mecânica dentro delas. De modo semelhante, é possível que as dificuldades que os estudantes universitários têm para a compreensão da Mecânica Quântica derivem da dificuldade de mudar os núcleos dos modelos mentais que servem para explicar o ‘mundo clássico’. Os núcleos dos novos modelos mentais necessários à compreensão dos fenômenos quânticos deveriam incluir os conceitos de *superposição de estados* (não apenas como um artifício matemático senão como uma realização física possível do estado de um sistema), *princípio de incerteza* (como impossibilidade intrínseca do mundo microscópico e não como limitações ou do dispositivo de medida ou do desconhecimento de variáveis do sistema), *objetos quânticos* (com propriedades particulares que se assemelham às vezes às partículas clássicas e outras às ondas, porém que não se identificam nem com uma nem com outra), *probabilidade* (que difere do conceito clássico de probabilidade tanto no fato de que por mais ideal que seja um dispositivo experimental, as previsões do mundo quântico são sempre feitas com uma determinada probabilidade, quanto no fato de que as probabilidades quânticas ‘interferem’), e *não localidade* (segundo a qual a ação sobre um objeto microscópico pode mudar instantaneamente o estado de outro espacialmente distante). Nesta pesquisa tentamos ver como era que alunos universitários entendiam alguns destes conceitos.

Amostra

Foram investigados três grupos de alunos universitários pertencentes a distintos cursos da UFRGS. O primeiro grupo (N=5) estava formado por alunos da disciplina de Mecânica Quântica I do Bacharelado em Física que já tinham visto tanto conceitos quanto ferramentas matemáticas necessárias para a Mecânica Quântica em dois cursos anteriores, um de Introdução a Mecânica Quântica e outro de Métodos Matemáticos da Física. Esta disciplina é basicamente formal. Os dois outros grupos estavam constituídos por estudantes da disciplina Física IV da Engenharia Civil (N=10) e por estudantes da mesma disciplina, porém da Engenharia Química (N=14). Tipicamente nesta disciplina, em geral com uma abordagem do tipo fenomenológica, são vistos conteúdos de Mecânica Quântica em 5 semanas e se configuram na única oportunidade na qual estes alunos deveriam estudar conceitos básicos de Mecânica Quântica em forma sistemática. Contudo, todos os alunos de Engenharia Química haviam cursado anteriormente pelo menos uma disciplina com algum conteúdo de Mecânica Quântica.

Metodologia

Foram ministrados pré e pós-testes de associação de conceitos aos três grupos. Cada conceito chave, ou seja, cada um dos 10 conceitos que foram selecionados para a pesquisa foi apresentado no topo de uma folha em branco. A tarefa dos sujeitos era escrever logo abaixo tantos conceitos (ou palavras) quantos pudessem associar ao conceito. A esta tarefa é dado, geralmente, um certo tempo, um ou dois minutos para cada conceito, mas no nosso caso não impusemos nenhuma limitação temporal. Os testes continham, além dos conceitos, três questões, vinculadas aos conceitos selecionados (sobre princípio de incerteza, sobre probabilidades e sobre resultados das medições; vide Apêndice). Neste trabalho preliminar os conceitos e as questões para a turma de que cursava Mecânica Quântica I foram parcialmente diferentes dos escolhidos para as turmas que cursavam Física Geral IV. (Nas figuras 2, 3, 4, 5 e 6 aparecem os conceitos que foram utilizados nos testes de associação de conceitos para cada caso).

Os dados coletados foram analisados tanto quantitativa como qualitativamente. Para a análise quantitativa os dados dos testes de associação de conceitos foram transformados em coeficientes de relacionamento entre os conceitos-chave. Foi escolhido o método de Garskof & Houston (1963) para determinar este coeficiente, o qual varia de 0 a 1 e dá a medida de proximidade entre dois conceitos que varia com a ordem hierárquica dos conceitos ou palavras associados a esses conceitos. Os coeficientes resultaram em uma matriz similaridade que foi analisada pela técnica de agrupamentos hierárquicos, sendo utilizado o pacote estatístico SPSS versão 8.0

A Análise de Agrupamentos Hierárquicos (AAH) é uma técnica que permite descobrir a estrutura, se houver, inerente ao conjunto de medidas de similaridade (Santos, 1978). A AAH supõe apenas a existência de uma estrutura com uma métrica particular que não está necessariamente definida em um espaço físico concreto. A AAH dá uma escala hierárquica entre os conceitos, de forma que quanto mais afastado está o ponto de ligação, menor é a interação entre eles. Nos resultados apresentados a seguir, a distância entre os conceitos está re-escalada para um intervalo de 0 a 25. Como o valor 25 pode representar uma distância infinita entre os conceitos, ou seja, que não tenham nenhuma interação entre eles e, portanto, os agrupamentos feitos nesse ponto não serem significativos, foi tomado como valor de corte para a análise dos agrupamentos mais significativos a distância 15. Esta distância corresponde à distância máxima onde acontecem as maiores interações entre os conceitos para as AAH de dois especialistas que responderam ao teste.

Quando os alunos respondiam aos testes de associação de conceitos, muitas vezes incluíam, além da lista de conceitos, frases explicativas. Assim, estas respostas complementares dos testes de associação, junto com as respostas das questões foram os dados analisados qualitativamente.

Resultados

Apresentaremos primeiramente os resultados da análise qualitativa para os alunos dos cursos de Engenharia.

A) Respeito à questão sobre a estabilidade do átomo, os modelos que os alunos pareciam estar usando podem ser caracterizados como:

- 1) Círculo : A força centrífuga resultante do movimento de rotação do elétron ao redor do núcleo se iguala à força elétrica entre o elétron e o núcleo. A trajetória do elétron em volta ao núcleo é vista como uma circunferência (*"Se o elétron parasse iria unir-se ao núcleo...O nível de rotação em volta ao núcleo é mínimo para que não ocorra tal colisão..."*)
- 2) Carga : O elétron se mantém no seu estado de menor energia pois o átomo está neutro. (*"o elétron no estado de menor energia possível não está parado, está neutro"*)
- 3) Planetário : Para explicar a estabilidade do átomo os alunos falam que o elétron está em órbita, ou em um orbital, podendo ser esta circular, elíptica ou zig-zag. Não se faz referência a nenhum mecanismo que mantenha o elétron em órbita, pelo que mais parece ser uma imagem.
- 4) Inercial: Este modelo parece ser uma "degradação" do modelo de círculo. A causa para que o elétron não colapse no núcleo é sua massa pequena (*" o elétron tem uma massa tão pequena que quase não perde energia e por isso não cai..."*)
- 5) Camada: O elétron está em uma camada, fixo ou movimentando-se. A camada é o nível mais estável, de forma que o elétron precisaria de energia extra para sair dela. A camada ou nível energético é já uma explicação em si. Este é o modelo usado maioritariamente pelos estudantes de Engenharia Química. (*"o elétron está na camada de menor energia. Se se movesse, emitiria...Não entanto, não está parado, pois ainda fica o spin..."*)
- 6) Localização de energia: A estabilidade do átomo é associada ao princípio de incerteza. Diferentemente dos casos anteriores, os alunos que utilizam o princípio de incerteza para explicar a estabilidade do átomo deixam de considerar o elétron como uma "bolinha" e passam a considerá-lo como uma nuvem, como um fluido ou localizado numa eletrosfera. As explicações, no entanto, não são completas nem totalmente corretas. (*"Não podemos assegurar que o elétron está no estado de menor energia ou que está parado, porque pelo princípio de incerteza de Heisenberg não podemos determinar a posição e a energia do elétron num mesmo tempo..."*)

Na Figura 1 aparece o número de alunos para cada modelo, antes e depois da instrução. Os dois primeiros modelos desaparecem após a instrução e aumenta o número de alunos que utilizam o modelo de camada. Ainda assim o número de estudantes que não consegue responder a esta questão (representado no gráfico pela categoria 7) é alto.

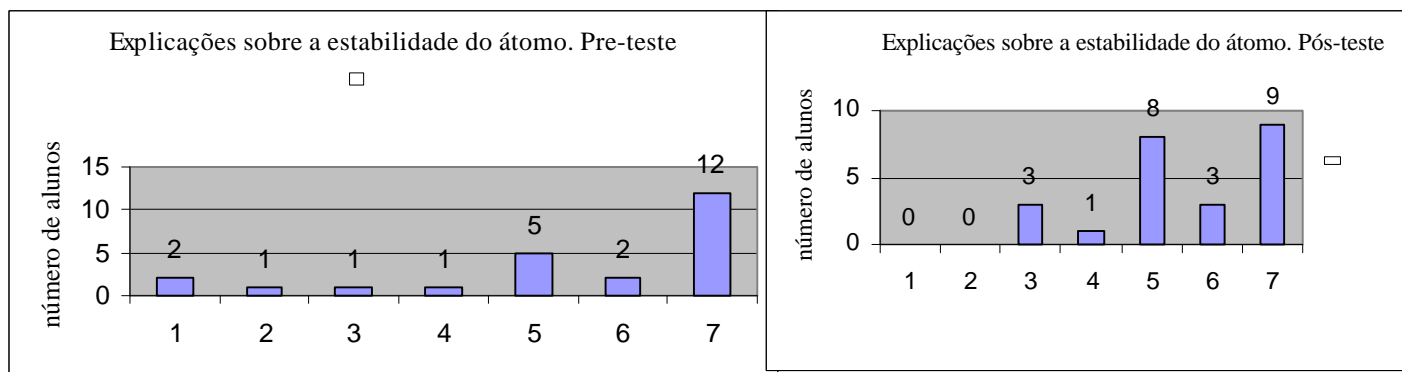


Figura 1: O eixo x, nos dois gráficos, representa os distintos modelos: 1 - Círculo; 2- Carga; 3- Planetário; 4- Inercial; 5- Camada; 6-Princípio de incerteza; 7- Não responde.

- B) A quantização está associada somente aos níveis de energia dos elétrons e, às vezes, é associada com a própria energia. (*"a quantização é a energia dos orbitais..."; "é a região de maior probabilidade de achar o elétron..."*)
- C) Para aqueles alunos que se referem ao princípio de incerteza, este é entendido como probabilidade. Os alunos consideram que esse princípio vem da imprecisão nas medidas, que exigem então um tratamento estatístico.
- D) O elétron é considerado, por quase a totalidade dos alunos como uma partícula clássica com massa, energia e momento que percorre trajetórias definidas.
- E) O fóton, por sua vez, é visto como uma forma de partícula "clássica" de energia, ou seja, para a maioria dos estudantes pareceria muito difícil dissociar o conceito de partícula do conceito de massa; portanto, se o fóton é (ou se comporta como) uma partícula, deve ter massa (*"...partícula tão pequena, que antes era considerada energia.."; "...o fóton tem massa igual a zero. Porém é uma partícula...Acredito que a pressão da luz faça às vezes de massa..."*)
- F) A dualidade onda partícula está quase sempre associada ao fóton. Existem algumas tentativas por parte dos alunos de conciliar este conceito nos moldes clássicos, ou seja, de tentar compreender dentro das definições clássicas de onda e de partícula o conceito de dualidade (*"o fóton é uma partícula na onda de luz...";"elétron: luz percebida como onda na difração e como partícula na troca.."*)

As Figuras 2 e 3 mostram os resultados da AAH para o grupo de Engenharia Civil. Lembremos que o valor de corte é 15, ou seja, a partir daí não são considerados significativos os agrupamentos. Pode-se ver que, antes da instrução, os únicos conceitos que aparecem mais relacionados são os de fóton e de elétron. Já no pós-teste, verifica-se uma mudança na associação de conceitos. Junto aos conceitos de fóton e de elétron aparece agora o conceito de dualidade. Também aparecem juntos os conceitos de função de onda e de probabilidade, agregando-se posteriormente a este agrupamento o de princípio de incerteza. O conceito de quantização aparece associado ao agrupamento onde estão os conceitos de elétron, fóton e dualidade.

O conceito de função de onda está pobremente relacionado com os restantes conceitos. Outro conceito que não aparece relacionado é o de resultado de medida.

Distância	0	5	10	15	20	25
Conceito	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+	+-----+
Elétron	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----
Fóton	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----	-+-----
Hidrogênio	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Princ. Incer	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Dualidade	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Quantização	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Trajetoária	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Função de onda	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Resul. de medida	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Probabilidade	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Figura 2: Agrupamentos hierárquicos do pré-teste- Alunos Engenharia Civil

Distância	0	5	10	15	20	25
Conceito	+-----+-----+-----+-----+-----+					
Elétron	-+					
Fóton	-+					
Dualidade	-+					
Quantização						
Hidrogênio						
Função de onda						
Probabilidade						
Princ. Incer						
Trajectoria						
Resul. de medida						

Figura 3: Agrupamentos hierárquicos do pós-teste- Alunos Engenharia Civil

Nas figuras 4 e 5 aparecem os resultados do AAH para estudantes da Engenharia Química. Diferentemente da Figura 2 no pré-teste da Engenharia Química aparecem os conceitos de elétron e de princípio de incerteza associados e um outro agrupamento com fóton e dualidade. Os conceitos de probabilidade e função de onda agregam-se a estos dois conceitos posteriormente. No pós-teste, aparece de novo função de onda associado à probabilidade. Novamente quantização não está associado a função de onda e resultado de uma medição também não aparece relacionado com nenhum outro conceito. Elétron e hidrogênio se juntam em um agrupamento com função de onda e probabilidade, mas não se vincula o elétron ao agrupamento com os conceitos de dualidade e de fóton, agrupamento este que parece não ter sido modificado pela instrução. Em resumo, em ambos cursos, apesar das diferenças entre eles, conceitos centrais como função de onda, para descrever o estado de sistema, não se associa ao conceito de quantização (que deriva dela) e sua associação com um sistema físico, como átomo de hidrogênio, aparece só nos estudantes da Engenharia Química. Por outra parte, ainda que o conceito de probabilidade esteja associado ao de função de onda, não aparece vinculado ao de resultado de medida, que é onde o conceito de probabilidade, em Mecânica Quântica, adquire sua significação. Em ambas as turmas, o conceito de princípio de incerteza aparece pobremente relacionado aos outros. É interessante destacar que no caso dos alunos do curso de Engenharia Química, a associação entre dualidade e fóton não muda, depois da instrução, para agregar o conceito de elétron.

Distância	0	5	10	15	20	25
Conceito	+-----+-----+-----+-----+-----+					
Elétron	-+					
Princ. Incer	-+					
Probabilidade						
Função de onda						
Hidrogênio						
Dualidade						
Fóton						
Quantização						
Trajectoria						
Resul. de medida						

Figura 4: Agrupamentos hierárquicos do pré-teste- Alunos Engenharia Química

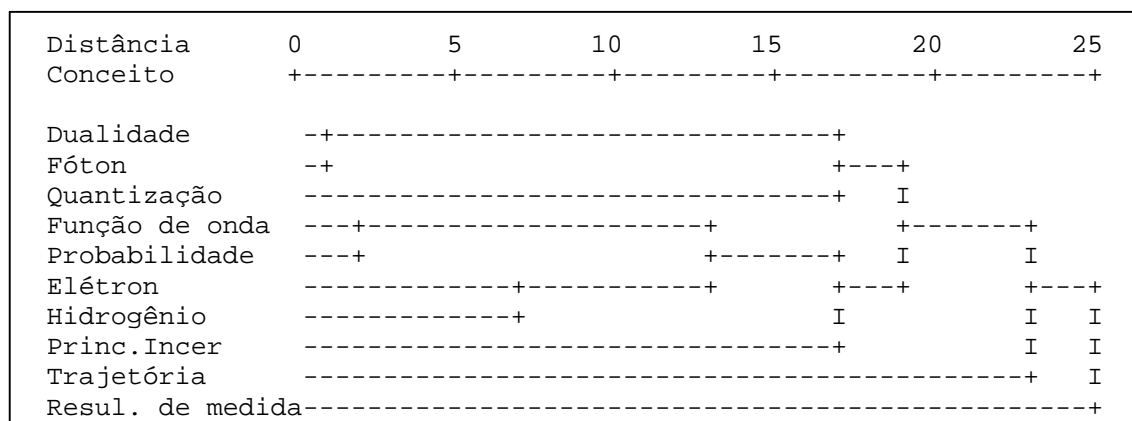


Figura 5: Agrupamentos hierárquicos do pós-teste- Alunos Engenharia Química

A respeito dos alunos de Mecânica Quântica I apresentamos somente os resultados do pós-teste, que aparecem na Figura 6, pois não houve diferenças significativas nas respostas do pré e pós-teste, assim como tampouco nas respostas às questões conceituais. Ao que parece, a disciplina de Mecânica Quântica I não gerou nenhuma modificação conceitual importante no mapeamento cognitivo destes alunos. Aparecem no primeiro agrupamento os conceitos de superposição linear de estados e de função de onda, mas, no entanto, não estão associados ao conceito de estado de um sistema físico, que é o que descrevem. Por outra parte, aparecem juntos os conceitos de observáveis e autovalores (possivelmente porque estão matematicamente relacionados, da mesma forma que função de onda e superposição linear de estados). Estes conceitos não se agrupam, como seria de esperar, com o conceito de resultado de medidas e sim com o conceito de estado de um sistema físico. Esta idéia parece um núcleo da Física Clássica: no mundo clássico o estado de um sistema físico coincide com o resultado das medidas realizadas sobre ele. No mundo quântico o estado de um sistema físico é dado pela função de onda e o resultado da medição de uma grandeza física realizada sobre esse sistema está probabilisticamente relacionado com o estado do sistema antes da medição. A suposição da existência deste núcleo clássico, ou melhor, das dificuldades na compreensão das relações entre estado de um sistema físico e resultados de uma medição, parece confirmar-se com as respostas que os alunos deram quando consultados especificamente a este respeito em uma das questões: 4/5 alunos responderam que "A Mecânica Quântica não diz nada sobre o estado do sistema antes da medição, que introduz perturbações que alteram completamente o estado do sistema". (Realizada uma entrevista com estes alunos se verificou que esta dificuldade estava associada à não compreensão do conceito de probabilidade e de superposição de estados como uma realização física possível do estado de um sistema)

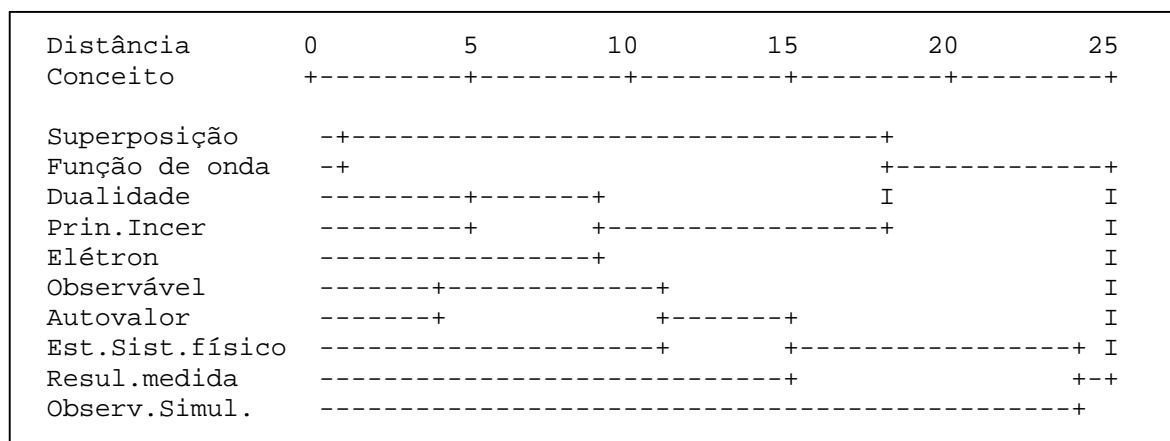


Figura 6: Agrupamentos hierárquicos do pós-teste- Alunos Mecânica Quântica I

Discussão dos resultados

Os resultados de ambas metodologias parecem confirmar que os alunos dos cursos de Engenharia, mesmo depois de ter tido várias aulas de Mecânica Quântica têm muitas dificuldades com os seus conceitos fundamentais. Por um lado, o conceito central de função de onda aparece pobremente relacionado com os outros conceitos, ressaltando-se só seu vínculo com o conceito de probabilidade para ambos grupos. Esta relação possivelmente esteja determinada pela ênfase dada nos livros de texto usuais para este tipo de curso.

Por outro, as idéias clássicas, sobretudo o conceito de partícula, não são modificadas pela instrução. Pode-se notar que a maioria dos modelos de estabilidade do átomo parecem resultar das tentativas de manter a idéia de partícula clássica com os conceitos quânticos. Somente quando os alunos parecem conseguir escapar deste conceito começam a incorporar alguns dos conceitos propriamente quânticos. Esta concepção parece também dificultar a compreensão do conceito de fóton e, portanto, do comportamento dual dos objetos quânticos. A este respeito é interessante destacar que a dualidade aparece mais vinculada ao fóton que ao elétron. É possível que isto aconteça porque tipicamente nas disciplinas de Física Geral se vê Ótica Física - cuja ênfase é a luz como onda- antes que Mecânica Quântica e quando esta é introduzida a maioria dos experimentos do início do século relatados aos alunos destacam a luz como partícula. Isto pode mascarar que o comportamento dual também se aplica para os elétrons. Além disto, estes cursos incluem o modelo de átomo de Bohr que reforça a idéia de elétron como partícula.

Com referência aos alunos de Mecânica Quântica I pareceria que os conceitos mais fortemente associados são os relacionados matematicamente. A relação deles com conceitos mais "físicos" ou é inexistente ou está errada. Estes resultados não foram mudados ao longo da disciplina que, com uma abordagem tipicamente formal, pareceria não discutir e, portanto não modificar, as questões conceituais de fundo aprendidas em cursos anteriores. A questão da incompreensão do que, em última instância, descreve a Mecânica Quântica é um resultado relevante: estes alunos vão trabalhar com ferramentas quânticas ao longo de sua carreira como físicos, mas depois de pelo menos três cursos com conteúdos quânticos não conseguiram entender para que ela serve, ainda que possam manipular com muita destreza seu formalismo. Isto parece confirmar a visão pragmática que, segundo Schreiber (1994), é favorita entre físicos e estudantes : A Mecânica Quântica é uma ferramenta poderosa que não precisa ser compreendida.

É importante ressaltar que os alunos dos três grupos são alunos que foram aprovados nas respectivas disciplinas e em sua maioria são alunos considerados bons, com conceitos A e B.

Considerações finais

Os resultados desta pesquisa corroboram, por um lado, os resultados de pesquisas anteriores (e.g. Fischler & Lichtfeldt, 1992; Petri & Niedderer, 1998) respeito das dificuldades dos estudantes com conceitos quânticos mas, por outro, também agregam alguns elementos novos, como por exemplo alguns dos modelos sobre estabilidade do átomo (o planetário e o inercial), a questão de como são entendidos os conceitos de quantização, de fóton e de dualidade e a dificuldade dos alunos de entender, no contexto da Mecânica Quântica, a relação entre estado de um sistema físico e resultado de uma medição, que envolve dificuldades com os conceitos de superposição de estados e de probabilidade.

Os resultados parecem confirmar, também, que as duas abordagens que caracterizam tipicamente os cursos introdutórios de Mecânica Quântica - a fenomenológica "histórica" e a formal - têm escasso sucesso: nenhum dos conceitos que consideramos fundamentais para a formação de modelos mentais sobre o mundo quântico pareceria ser compreendido pela maioria dos estudantes pesquisados.

Bibliografia

FISCHLER, H. & LICHTFELDT, M. (1992) "Modern physics and students' conceptions" *International Journal of Science Education*, 14(2), 181-190.

GARSKOF, B. & HOUSTON, J. (1963) "Measurement of verbal relatedness and idiographic approach." *Psychological Review*, 70(3), 277-288.

GERSHENFELD, N. & CHUANG, I. (1998), "Quantum computing with molecules", *Scientific American*, June, 50-55.

GRECA, I. & HERCOVITZ, V. 1998 Mecânica Quântica e intuição. Comunicação apresentada no Simpósio David Bohm. USP.

GRECA, I. & MOREIRA, M. A (1998), "Modelos mentais, modelos físicos e modelos matemáticos no ensino e na aprendizagem da Física" Atas do VI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física.

JOHNSON-LAIRD, P. (1983) *Mental Models*. Cambridge: Harvard University Press

JOHNSTON, I., CRAWFORD, K. & FLETCHER, P. (1998), "Student difficulties in learning quantum mechanics", *International Journal of Science Education*, 20(4), 427-440.

MERZBACHER, E. 1990. How shall we teach physics in the 21st century? *American Journal of Physics*, 58 (8), 717.

SCHREIBER, Z. 1994. *The nine lives of Schrödinger's cat*. Unpublished master thesis. University of London.

PETRI, J. & NIEDDERER, H. (1998) "A learning pathway in high-school level quantum atomic physics". *International Journal of Science Education*, 20(9), 1075-1088.

REDISH, E., BAO, L. & JOLLY, P. (1997) "Student difficulties with energy in quantum mechanics" Talk at the AAPT meeting, Phoenix

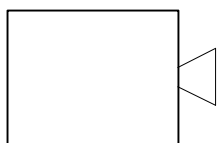
SANTOS, C. A. (1978) "Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos." Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: IF-UFRGS

Apêndice: Questões dos testes**a) Questões do grupo de Introdução à Mecânica Quântica**

1. Um elétron está confinado a uma caixa cúbica de largura L , sem sofrer interações com outros sistemas. Transcorrido algum tempo, pode-se assegurar que o elétron está no estado de menor energia possível. Isto significa que o elétron está parado? Por que?
2. Sabe-se que um elétron, praticamente livre, viaja com momento linear K constante. Coloca-se um anteparo quadrado A , à frente do elétron, ortogonal à direção do seu momento, e simetricamente disposto em relação a esta direção. Você espera que o elétron atinja o anteparo em algum ponto? Em que ponto do anteparo? Se outros elétrons seguirem o primeiro, exatamente com o mesmo momento, que resultados você espera para a medida da posição deles sobre o anteparo?
3. Um conjunto de sistemas atômicos, preparados todos do mesmo modo, é submetido a uma série de medidas de energia, obtendo-se para alguns sistemas E_1 , para outros E_2 , etc. Como se pode interpretar tal resultado? Estamos particularmente interessados em obter alguma informação sobre o estado do sistema antes da medida.

b) Questões do grupo de Física Geral IV

1. Um elétron de um átomo de H está ligado ao núcleo atômico, praticamente sem sofrer interações com outros sistemas. Transcorrido algum tempo, pode-se assegurar que o elétron está no estado de menor energia possível. Isto significa que o elétron está parado? Por que?
2. Uma certa fonte de elétrons é regulada para emitir praticamente um elétron por vez. No esquema simplificado abaixo encontra-se a fonte e o anteparo colocado à frente dela a certa distância. Desenhe no diagrama o que você acha que acontece com os elétrons ao se encontrar com um anteparo colocado a sua frente. Explique depois o desenho.



3. Estamos familiarizados com experiências que sugerem que a luz tem natureza ondulatória. No entanto, hoje existe evidência experimental que indica que a luz se comporta também como partícula. O que você acha que significa que “se comporta como constituída de partículas”?