



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E HISTÓRIA
DAS CIÊNCIAS.**

**A MECÂNICA QUÂNTICA NO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE
LICENCIANDOS EM FÍSICA: UM ESTUDO DE CASO.**

MARCOS ANTONIO BARROS SANTOS

CAMPINA GRANDE, PB - 2012.

MARCOS ANTONIO BARROS SANTOS

**A MECÂNICA QUÂNTICA NO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE
LICENCIANDOS EM FÍSICA: UM ESTUDO DE CASO.**

Tese de Doutorado elaborada Junto ao
Programa Interinstitucional de Pós
Graduação em Ensino, Filosofia e História
das Ciências à Universidade Federal da
Bahia, Universidade Estadual de Feira de
Santana e a Universidade Estadual da
Paraíba, para a obtenção do grau de Doutor.

Prof. Dr. Olival Freire Jr. (UFBA) - Orientador
Prof.^a. Dr.^a. Maria Auxiliadora Bezerra (UFCG) - Co-Orientadora

CAMPINA GRANDE, PB – 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL –
UEPB

S596m Santos, Marcos Antonio Barros.

A mecânica quântica no processo de formação de licenciandos em física [manuscrito]: um estudo de caso / Marcos Antonio Barros Santos. – 2012.

169 f.

Digitado.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, 2012.

“Orientação: Prof. Dr. Olival Freire Junior, Instituto de Física – UFBA”.

“Co-Orientação: Profa. Dra. Maria Auxiliadora Bezerra, Departamento de Letras - UFCG”.

1. Formação Docente. 2. Ensino e Aprendizagem. 3. Física - Mecânica Quântica. I. Título. II. Ostermann, Fernanda. III. Bastos, Heloisa Flora.

21.ed. CDD 371.12

MARCOS ANTONIO BARROS SANTOS

**A MECÂNICA QUÂNTICA NO PROCESSO DE FORMAÇÃO DE
LICENCIANDOS EM FÍSICA: UM ESTUDO DE CASO.**

BANCA EXAMINADORA

Presidente e Orientador:_____

Prof. Dr. Olival Freire Jr. - UFBA

Co-Orientador _____

Prof.^a. Dr^a. Maria Auxiliadora Bezerra - UFCG

1ºExaminador Externo_____

Prof.^a. Dr^a. Heloisa Flora Bastos Montenegro - UFRPE

2º Examinador Externo_____

Prof.^a. Dr^a. Fernanda Ostermann - UFRGS

3º Examinador Externo_____

Prof. Dr. Marcelo Gomes Germano – UEPB

4º Examinador Interno_____

Prof. Dr Elder Sales Teixeira – UEFS

5º Examinador Interno_____

Prof.^a. Dr^a. Maria Cristina Penido - UFBa

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese aos meus filhos, **Rayssa** e **Matheus**, para que percebam esta postura de busca pelo conhecimento e de prazer por estudar, como um modelo de vida a ser seguido!

AGRADECIMENTOS

Ao concluir um trabalho longo como o desenvolvimento de uma tese - ou pelo menos desta - é preciso agradecer a muitas pessoas, embora, lamentavelmente, esqueçamos muitas delas. Em particular, eu gostaria de não me esquecer de e de agradecer:

Ao **Prof. Dr. Olival Freire Jr.**, por ter acreditado em mim, pela autonomia no trabalho, pela consideração e amizade construída ao longo desses anos, pela disponibilidade e competência, pela orientação segura e, acima de tudo, pela inesgotável curiosidade intelectual que tem sido, há tantos anos, fonte de inspiração para todos os que o procuram, além, é claro, das frutíferas discussões realizadas sobre Mecânica Quântica;

De modo especial, à **Prof.^a Dr.^a Auxiliadora Bezerra**, educadora notável, que com a sensibilidade de seu intelecto, transformou nossos encontros, durante todo o período deste trabalho, em apoio e preciosas sugestões, além da paciência para as intermináveis correções de minha escrita;

À minha esposa **Ana Paula**, grande companheira e porto seguro, o meu agradecimento especial, por ter aceitado minhas ausências, compartilhado das minhas angústias, além de ter sonhado comigo a realização concreta desta tese;

À **Prof.^a Dr.^a Ileana Greca**, pela disponibilidade com que me orientou nos momentos iniciais, sugerindo o problema de pesquisa desta tese;

Aos professores e alunos da UFBA e UEPB, que se deixaram acompanhar durante a fase de coleta de dados, mesmo sabendo que estavam sendo observados, e que não deixaram de expor suas ideias, contribuindo de forma satisfatória para essa fase;

Aos membros da Banca de defesa (**Prof.^a Dr.^a Fernanda Ostermann, Prof.^a Dr.^a Heloisa Bastos, Prof.^a Dr.^a Helaine Sivini, Prof. Dr. Elder Sales, Prof. Dr. Marcelo Germano, Prof.^a Dr.^a Maria Cristina Penido**) pelas valiosas e excelentes sugestões a esta tese;

Aos meus pais, **Antônio (em memória) e Terezinha**, que não mediram esforços para proporcionar-me uma boa educação, ensinando-me a lutar com garra e persistência na busca de um ideal;

Aos meus irmãos (**Francinaldo, Beto – em memória – e Edson**) pela amizade, respeito, compreensão e orações;

À coordenação do DINTER, na pessoa da **Prof.^a Dr.^a Marcionila Fernandes**, pela incansável persistência na concretização deste doutorado;

Aos colegas de Departamento, pelo incentivo e compreensão nos momentos de ausência;

A DEUS, TODA HONRA E TODA A GLÓRIA...

RESUMO

Este trabalho buscou responder como se dá o processo de formação dos licenciandos em Física das Universidades Federal da Bahia (UFBA) e Estadual da Paraíba (UEPB) em relação aos fundamentos da Mecânica Quântica (MQ), a partir das disciplinas cujas ementas apontam para esse foco. A literatura tem nos mostrado que o ensino dessas disciplinas, na Licenciatura e no Bacharelado em Física, é muito formal, de difícil compreensão, estéril e superficial. No entanto, as pesquisas não nos mostram por que a formação do licenciando em Física é inadequada em MQ. Para este estudo de caso, no âmbito do paradigma qualitativo, utilizamos como instrumentos de coleta de dados: observação não participante, entrevistas estruturadas e análise de documentos (Oficiais e Didáticos). Essas descrições e análises, realizadas separadamente, são acompanhadas de uma discussão, para se ter uma visão mais acurada a respeito da formação desses licenciandos em relação aos fundamentos da MQ. Essas descrições e suas posteriores discussões nos conduzem ao porquê de essa formação ser inadequada aos futuros professores de Física: discrepâncias e limitações de conteúdos, aspectos matemáticos mais proeminentes do que os conceituais e fenomenológicos, tornando o seu ensino mais técnico e mais formal, buscando sempre analogias com a Física Clássica. Paralelamente a essas discussões, apresentamos também uma análise descritiva dos documentos oficiais (ementas, provas do ENADE, PPP e diretrizes curriculares), que compõem a estrutura curricular dos cursos de Licenciatura em Física da UFBA e UEPB. A partir dessas análises, encontramos inadequações ao ensino da MQ para licenciandos em Física, priorizando fortemente os seus aspectos instrumentais, em detrimento da discussão e apropriação dos conceitos da própria teoria.

PALAVRAS-CHAVE: Mecânica Quântica. Formação de professores. Ensino-aprendizagem.

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the process of training of physics teachers graduated at Universidade Federal da Bahia (UFBA) and Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) in terms of the fundamentals of quantum mechanics (QM) that they acquired on courses containing this subject. The literature shows that the teaching of this subject, in both licentiate and bachelor degrees in physics, are too formal, tough, and superficial. However, the researchers do not indicate the reasons why the pre service training of a physics teacher is inappropriate in QM. To conduct this case study, in the scope of the qualitative paradigm, we used appropriate data collection instruments: peer observation, structured interviews and document analyses (both pedagogical and officials). These descriptions and analyses, conducted separately, are followed by a discussion in an attempt to gain the most accurate view of the training of these teachers in terms of QM. This procedure lead us to find out the reasons for the inadequate education of the future physics teachers: discrepancies and limitations of contents, mathematics features more prominent than conceptual and phenomenological, making the teaching more technical and formal, and seeking comparison with the classic physics. In parallel to these discussions, we performed a descriptive analysis of official paperwork (ENADE exams, contents, PPP and curricular guidelines), that are part of the curricular structure of the physics teachers courses in UFBA and UEPB. from these analyzes, we consider that the teaching of QM is inadequate for physics teachers, focusing mainly on instrumental aspects, disregarding discussions and theory concepts.

Keywords: Quantum Mechanics. Teacher Training. Teaching and Learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esboço estrutural da Teoria Quântica.....	38
Figura 2. Detecção de vários pontos na tela.....	44
Figura 3. Difração de elétrons.....	46
Figura 4. Experimento da dupla fenda (experimento do pensamento).....	49
Figura 5. Contrariando a relação de Incerteza (Energia-tempo).....	50
Figura 6. Anteparo com uma fenda e filme fotográfico.....	54
Figura 7. Experimento de Stern-Gerlach.....	55
Figura 8. Experimento de Stern-Gerlach – modificado.....	55
Figura 9. Experimento imaginado por Wigner.....	56
Figura 10. Experiência com a versão simplificada de D. Bohm.....	60
Figura 11. Receptividade, em termos de citações, do teorema de Bell.....	61

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1. Respostas dadas, pelos alunos observados, à questão 3(a) – UFBA.....	79
Quadro 2. Respostas dos alunos na entrevista sobre estado quântico.....	86
Quadro 3. Respostas às questões 4 (a) e 4 (b) – UFBA.....	88
Tabela 1. Discriminação das questões analisadas – ENADE.....	129
Tabela 2. Conteúdos das questões – ENADE.....	129

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
3.1 Discussão dos conceitos fundamentais da MQ.....	30
3.2 Interpretações da Mecânica Quântica.....	33
3.3 Objeções de Einstein aos princípios da Complementaridade e da Incerteza.....	48
3.4 Outros problemas nos fundamentos quânticos.....	52
3.4.1 O problema da medição.....	53
3.4.2 O paradoxo do Gato de Schrödinger.....	57
3.5 O teorema de Bell.....	58
3.5.1 O experimento de Aspect.....	61
4. METODOLOGIA.....	64
4.1 Pesquisa qualitativa.....	64
4.2 Estudo de caso.....	65
4.3 Instrumentos da pesquisa e procedimentos para a coleta de dados.....	66
4.3.1 Observação não participante.....	66
4.3.2 Entrevistas e conversa informal com professores e alunos.....	69
4.3.3 Documentos.....	70
5. RELATO DAS OBSERVAÇÕES/ENTREVISTAS/DOCUMENTOS DIDÁTICOS.....	73
5.1 O caso da UFBA.....	73
5.1.1 Discussão dos resultados – UFBA.....	91
5.2 O caso da UEPB.....	96
5.2.1 Discussão dos resultados – UEPB.....	112
6. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS DOCUMENTOS OFICIAIS.....	118
6.1 O caso da UFBA.....	118

6.2 O caso da UEPB.....	121
6.3 Diretrizes Curriculares Nacionais.....	125
6.4 Enade (Exame Nacional dos Estudantes).....	128
6.5 Discussão dos resultados.....	137
 7. CONCLUSÕES.....	 140
 REFERÊNCIAS.....	 143
 ANEXOS.....	 149
 Anexo 1 – Fluxograma do curso de Lic. Em Física – UFBA- Noturno.....	150
Anexo 2 – Currículo e perfil do Licenciando em Física – UFBA.....	151
Anexo 3 – Ementa e Objetivos da Disciplina Estrutura da Matéria I - UFBA.....	152
Anexo 4 - Fluxograma da Lic. Em Física - UEPB – Diurno.....	153
Anexo 5 – Ementa da disciplina de Mecânica Quântica – UEPB.....	156
Anexo 6 – Ementa da disciplina de Física Moderna – UEPB.....	159
Anexo 7 – Provas da UEPB.....	164
Anexo 8 – Roteiro da Entrevista – Professor.....	169
Anexo 9 – Roteiro da Entrevista – Aluno.....	170

1. INTRODUÇÃO

“Todos esses cinquenta anos de reflexão não me trouxeram mais perto da resposta à questão - O que é um fóton? Hoje em dia todo Tom, Dick e Harry pensa que sabe a resposta, mas ele está enganado”.

Albert Einstein (1879 – 1955)

A escolha do tema de pesquisa desta tese está diretamente relacionada a situações vivenciadas ao longo da nossa vida estudantil e das nossas atividades como professor no Ensino Médio e Superior, especificamente, no curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Durante a nossa formação em Licenciatura em Física, não tivemos a oportunidade de discutir os fundamentos básicos da Mecânica Quântica (MQ) e o que nos foi apresentado resumia-se aos aspectos matemáticos de uma Física dita moderna, em que a teoria do corpo negro e o modelo atômico de Bohr, por exemplo, com suas nuances semiclássicas e com um forte apelo à resolução de questões, eram suas vertentes consideradas modernas. Nas disciplinas estudadas durante os cursos de pós-graduação (especialização e mestrado, ambos em Ensino de Ciências), esse perfil pouco mudou. Não encontramos ali nenhuma forma diferente de analisar aquela Física Moderna que tínhamos visto no curso de graduação: continuávamos resolvendo questões da mesma natureza, com muitos cálculos matemáticos e sem nenhum vínculo com os aspectos conceituais, históricos e filosóficos, essenciais à compreensão da MQ.

Durante o desenvolvimento da nossa pesquisa, no Mestrado, várias referências bibliográficas lidas (EULER et al. 1999; MONTENEGRO et al. 2002; FLETCHER et al. 1998; MASSHADI, 1996; OSTERMANN; RICCI, 2004; entre outros) apontavam, de forma significativa, para uma percepção estéril e superficial por parte dos alunos de Licenciatura e Bacharelado em Física, acerca das ideias fundamentais da MQ. Essas pesquisas indicavam que os maiores obstáculos à compreensão dessa teoria eram de dois tipos: um consistia na dificuldade dos alunos em observar novos fenômenos, orientados por novos conceitos, incompatíveis com os clássicos, já do conhecimento desses alunos; e o outro correspondia aos aspectos matemáticos, que, de certa forma,

desencorajavam os futuros professores a tentarem inserir tópicos de MQ no Ensino Médio.

A busca por esses princípios teóricos, relevantes à formação de professores de Física, levou-nos a realizar, no Curso de Mestrado, uma pesquisa-intervenção, que, partindo dos conhecimentos prévios dos alunos de Licenciatura em Física (UEPB) sobre o fenômeno da difração de elétrons, favorecesse uma maior articulação entre as visões corpuscular e ondulatória da matéria. Orientada pelo aporte teórico do Ciclo da Experiência Kellyana (BARROS; BASTOS, 2007), a pesquisa mostrou, entre seus resultados, uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto por parte dos estudantes.

No doutorado, duas disciplinas foram fundamentais para a nossa formação: Tópicos em desenvolvimento histórico da pesquisa em fundamentos da Teoria Quântica e Tópicos especiais da Teoria Quântica. A primeira delas nos qualificou no sentido de que os seus conteúdos possibilitaram discutir acerca dos relevantes fundamentos epistemológicos assumidos pela MQ, a partir do instante em que, permeada por controvérsias sobre seus fundamentos e interpretações, ao longo da consolidação da teoria e de seus postulados quânticos, permitiu-nos compreender melhor o seu desenvolvimento científico, histórico e filosófico de forma dinâmica. A segunda disciplina, de cunho introdutório, explorou os aspectos matemáticos (formulações de Schrödinger e Dirac) inerentes aos postulados quânticos e demonstrou como os algoritmos estatísticos, aliados à evolução linear da MQ e ao postulado da projeção, podem ser utilizados para análise de fenômenos ou previsão de resultados experimentais. Associado a essas propostas, desafiando a visão tradicional, dois livros foram fundamentais (GREENSTEIN, G; ZAJONC, A. G, 1997; PESSOA JR, 2003) no sentido de nos oferecer uma visão diferenciada do que faz a maioria deles, incrementando o alcance cognitivo da teoria quântica, a partir das implicações filosóficas presentes na compreensão de experimentos reais.

A ideia para a elaboração do projeto que originou esta tese surgiu de afirmações de Freire Jr. (2009) sobre a necessidade de se ultrapassar o formalismo necessário ao ensino de fundamentos quânticos (aqui entendidos como os aspectos conceituais, históricos, matemáticos, experimentais e filosóficos) e de se buscar em recentes resultados experimentais estímulos que possibilitem a inserção da MQ no Ensino

Médio. Para isso, seria fundamental que se analisassem as dificuldades conceituais que os graduandos demonstravam, em relação aos conteúdos quânticos, seu ensino nos cursos médios e a formação dos professores para tal ensino.

Recentes desenvolvimentos na miniaturização da eletrônica, na nanotecnologia e na computação quântica, suscitados historicamente a partir das controvérsias de interpretação dos seus fundamentos, geram dispositivos que só são entendidos através dos postulados e princípios da MQ. Por isso, há um despertar natural para a compreensão dos seus fundamentos, uma vez que determinados conteúdos da MQ já fazem parte da vida das pessoas, inclusive dos alunos. Dessa forma, torna-se necessário tanto aos alunos de nível superior - como os de Física, de Química, das engenharias, de Biologia - quanto aos do Ensino Médio, uma compreensão mais equilibrada da base conceitual, histórica, filosófica e experimental dos seus postulados e princípios. Além disso, torna-se também necessário que esses possam ser mais discutidos e mais elaborados, amenizando o abstrato formalismo matemático, típico dessa disciplina e que tem gerado desinteresse para sua aprendizagem, por parte dos estudantes, conforme tem nos revelado a literatura.

Diante desse quadro, propusemos nossa pergunta de pesquisa:

- Como a formação dos licenciandos em Física das Universidades Federal da Bahia (UFBA) e Estadual da Paraíba (UEPB) habilita-os para o ensino da Mecânica Quântica?

Buscando responder a essa questão, inicialmente, recorreremos à literatura (OSTERMANN; PEREIRA, 2009; GRECA; FREIRE Jr., 2012), que nos mostra que o ensino de MQ nos cursos de Licenciatura é deficitário. O mesmo não acontece com a formação do Bacharel em Física, que apesar dos mesmos problemas epistemológicos, parece ser de possível correção, pois à medida que esses alunos avançam, na pós-graduação, mais cedo ou mais tarde, o próprio ambiente da academia irá expô-los a esses avanços. No entanto, as pesquisas não nos mostram por que a formação do licenciando em Física é inadequada em MQ. Se há um consenso para se introduzir o ensino dos fundamentos de MQ ou Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, levando-se em conta a crescente utilização de novas tecnologias, é necessário não apenas uma reestruturação curricular em termos de conteúdos, mas, principalmente, uma renovação nas metodologias de ensino, para tornar possível a sobrevivência desses saberes como saberes escolares. Assim sendo, nossa pesquisa tem como objetivo geral:

- Analisar a formação de licenciandos em Física, especificamente em relação ao domínio dos fundamentos da Mecânica Quântica, nas universidades citadas.

E tem como objetivos específicos:

- Identificar como os conteúdos disciplinares, relativos aos fundamentos da MQ, presentes nos documentos didáticos (ementas, programas, livros textos adotados e aulas observadas), são trabalhados nos cursos de Licenciatura em Física nas IES citadas;
- Verificar que conteúdos dos fundamentos da MQ são contemplados nos documentos oficiais (Diretrizes Curriculares Nacionais, Projetos Políticos Pedagógicos - PPP);
- Relacionar os conteúdos de MQ utilizados na prova do ENADE com aqueles estudados nas disciplinas dos dois cursos.

Assim, acreditamos que a relevância desta pesquisa reside no fato de que a nossa revisão de literatura tem apontado que a formação do licenciando em Física apresenta lacunas e inadequações, no que se refere aos ensinamentos dos fundamentos da MQ. No entanto, não há estudos como este que propomos que mostrem o porquê da sua inadequação.

A tese se encontra dividida em sete capítulos, contemplando todos os processos de desenvolvimentos sugeridos por seus respectivos objetivos. No segundo capítulo deste trabalho, chamado de revisão de literatura, recorreremos a duas recentes revisões bibliográficas, Ostermann e Pereira (2009) e Greca e Freire Jr (2012), que realizaram uma densa revisão de trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea e de MQ, no Ensino Superior. Dentre os vários artigos citados por esses autores, selecionamos, para nossa análise, os trabalhos acadêmicos que exploram, especificamente, o processo de formação do futuro professor de Física, verificando suas dificuldades de aprendizagem e analisando algumas propostas de cursos sobre os aspectos conceituais da MQ, e seus resultados de aprendizagem. Apesar de poucos trabalhos destinados à formação de professores, verificamos que a maioria das concepções dos alunos aponta para uma falsa analogia entre a Física clássica e a quântica, denotando que esses alunos possuem ideias clássicas arraigadas em sua estrutura conceitual, usando-as inadequadamente para entender estruturas quânticas. Além disso, o duro formalismo matemático exigido, sem uma correlação com a teoria, contribui para a sua rejeição. Por outro lado, propostas

pedagógicas inovadoras, contemplando os aspectos históricos e filosóficos presentes nas grandes controvérsias, além do uso de simulações, apontam para uma compreensão mais significativa de alguns fundamentos quânticos.

O terceiro capítulo é dedicado à fundamentação teórica. Nesse capítulo, realizamos um levantamento dos fundamentos teóricos (postulados e princípios), em relação a assuntos inerentes ao processo ensino-aprendizagem da disciplina de Mecânica Quântica (MQ), próprios à formação do licenciando em Física. Mesmo não tendo como objetivo aprofundar-se em nenhum dos temas apresentados, esse capítulo levanta algumas discussões que estiveram, e ainda estão, na agenda da Física atual, bem como são discussões presentes na história e na filosofia da MQ. Um curso de Licenciatura em Física que chame a atenção para esses problemas, contextualizando os desenvolvimentos que foram e são realizados pela MQ e incluindo dentro desse quadro aspectos sobre os debates em torno de suas interpretações e de seus problemas de fundamentos, está, na ótica aqui adotada, oferecendo uma formação mais rica sobre a MQ, em especial a licenciandos em Física. Assim sendo, não daremos atenção aos eventos que originaram a MQ, entre o final do século XIX e o início do XX, por entender que eles não são pertinentes a essa perspectiva.

No quarto capítulo deste trabalho, chamado de metodologia, descrevemos de forma detalhada o procedimento metodológico de nosso estudo, em que foi priorizada a abordagem qualitativa. A opção por essa abordagem ocorreu em decorrência do contexto a ser investigado, permitindo-nos descrever, compreender e analisar como se dá o processo de formação do licenciando em Física em relação ao ensino da disciplina Mecânica Quântica (MQ), nos cursos de Licenciatura em Física da UFBA e da UEPB, durante a fase em que eles cursaram as disciplinas relativas à MQ, como Estrutura da Matéria I, Física Moderna e Mecânica Quântica. Para esse estudo de caso, utilizamos instrumentos de coleta de dados que lhe são peculiares e indicadores adequados para o entendimento da natureza do nosso problema de pesquisa, como: observação não participante, entrevistas estruturadas e análise de documentos (Oficiais e Didáticos).

No quinto capítulo, temos a análise dos dados colhidos nas observações, nas entrevistas e nas diversas avaliações realizadas. Essas descrições e análises, realizadas separadamente, são acompanhadas de uma discussão, para se ter uma visão mais acurada a respeito da formação desses licenciandos em relação aos fundamentos da MQ.

Essas descrições e suas posteriores discussões nos conduzem ao porquê de essa formação ser inadequada aos futuros professores de Física, apontando para várias discrepâncias e limitações de conteúdos, aspectos matemáticos mais proeminentes do que os conceituais e fenomenológicos, tornando o seu ensino mais técnico, mais formal, tradicional, buscando sempre analogias com a Física Clássica.

No sexto capítulo, apresentamos uma análise descritiva dos documentos oficiais (ementas, provas do ENADE, PPP e diretrizes curriculares), que compõem a estrutura curricular dos cursos de Licenciatura em Física da UFBA e UEPB. Nessa análise, separadamente, identificamos elementos e formas de articulação entre esses elementos, permitindo uma comparação com o que foi analisado no capítulo anterior. Nesse sentido, verificamos que aqui também não há uma consonância com o tipo de formação preconizada por esses documentos, como pouca adequação aos fundamentos da MQ, apontando muito mais para os aspectos semiclássicos da estrutura da matéria, como apontam as questões dos ENADES. Dessa forma, o processo de aprendizagem e o desempenho acadêmico dos estudantes em relação aos conteúdos quânticos previstos nas Diretrizes Curriculares das Licenciaturas em Física, suas habilidades para ajustar-se às exigências decorrentes da evolução do conhecimento e suas competências estão sendo contemplados de forma superficial.

Por fim, no último capítulo, redigimos as conclusões finais desta tese e nossas considerações pessoais sobre o trabalho realizado e sobre o que se tem a realizar. Nesse sentido, pretendemos colaborar com as discussões curriculares, nos cursos de Licenciatura em Física, em especial para as disciplinas que contemplam os aspectos quânticos. Cumpre ressaltar, aqui, que o caminho para a dissertação que escolhemos persegue, inicialmente, o esclarecimento de conceitos fundamentais necessários à compreensão das questões epistemológicas e específicas da MQ, por parte dos licenciandos em Física.

2. REVISÃO DE LITERATURA

“Não leve essa aula muito a sério... apenas relaxe e desfrute dela. Vou contar para vocês como a natureza se comporta. Se você admitir simplesmente que ela tem esse comportamento, você a considerará encantadora e cativante. Não fique dizendo para você mesmo “Mas como ela pode ser assim?” porque nesse caso você entrará em um beco sem saída do qual ninguém escapou ainda. Ninguém sabe como a natureza pode ser assim”.

Richard Feynman (1918-1988)

Considerando que nosso trabalho trata da formação de licenciandos em Física associada a fundamentos de MQ, cabe, neste capítulo, fazermos uma revisão dos trabalhos de Ostermann & Pereira (2009) e Greca & Freire Jr (2012), que realizam uma densa revisão de trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea e de MQ, no ensino superior. Dentre os vários artigos citados por esses autores, selecionamos, para nossa revisão, os trabalhos acadêmicos que exploram, especificamente, o processo de formação do futuro professor de física, verificando suas dificuldades de aprendizagem e analisando algumas propostas de cursos sobre os aspectos conceituais da MQ, e seus resultados de aprendizagem.

Recentemente, Greca, I. M e Freire Jr. (2012) pesquisaram 32 artigos, publicados no período de 2000 a 2011, sobre o ensino de Física Quântica, em nível médio e superior. Nesse contexto, foram analisadas oito revistas¹, com o objetivo de averiguar o que as novas propostas para o ensino de Física quântica, emergentes das pesquisas em ensino de ciências, estavam sugerindo para melhorar a compreensão dos alunos sobre conceitos quânticos. Esses pesquisadores constataram que apenas 11 dos artigos pesquisados mencionam os resultados da implementação de projetos diferenciados, sinalizando para uma boa compreensão, por parte dos alunos, dos conceitos ali abordados. Esses projetos aqui analisados foram classificados em três grandes grupos: pesquisas que contemplam

¹ International Journal of Science Education, Journal of Research in Science Teaching, Science Education, Science & Education, Research in Science Education, American Journal of Physics, European Journal of Physics, and Physical Review Letters - Special Topics.

as lições de história e filosofia sobre os fundamentos quânticos; artigos com críticas ao ensino clássico da MQ; e artigos contendo propostas de novas estratégias didáticas para o ensino introdutório de MQ. Por último, os autores discutem a importância que a interpretação da complementaridade tem desempenhado na história do ensino da MQ.

Para o primeiro grupo de pesquisa, o foco concentrou-se nos aspectos históricos e filosóficos por trás das controvérsias originadas com as interpretações dos fundamentos quânticos, ao longo dos anos. Nesse sentido, os autores argumentam que as consequências filosóficas envolvidas nos teoremas EPR e de Bell, além dos seus testes experimentais, sinalizam diretamente para o ensino dos fundamentos essencialmente quânticos, em cursos introdutórios de MQ. Naturalmente, para entender essas controvérsias, os estudantes precisam estar atentos ao seu formalismo matemático, que lhe é intrínseco.

Para o segundo grupo de pesquisa, os autores nos alertam para a inserção de aspectos históricos, presentes no final do século XIX e no início do século XX, em cursos introdutórios de física quântica que, além de insalubres, reforçam, entre os estudantes, conceitos indesejáveis entre a física clássica e a quântica, em detrimento de assuntos verdadeiramente quânticos. Esse reforço, segundo os autores, parece vir dos livros didáticos utilizados na maioria dos cursos de graduação e pós-graduação. A maioria desses livros, com raras exceções, privilegia muito mais os seus aspectos matemáticos, do que suas implicações epistemológica, filosófica e conceitual, reduzindo assim, o alcance cognitivo da teoria quântica. Esse elevado interesse em calcular os problemas quânticos, segundo os autores, surgiu no pós-segunda guerra, no qual os alunos, bacharelados e licenciados em Física e de outras áreas, eram incentivados a resolver extensas listas de exercícios, memorizando seus substratos. Concluindo, os autores sinalizam para alguns artigos que investigam as dificuldades que os estudantes apresentam com as disciplinas ligadas às teorias quânticas, além de apresentar algumas estratégias didáticas, no sentido de facilitar a sua aprendizagem.

Por último, mas não menos importante, os autores discutem alguns artigos que sugerem novas propostas para o ensino de MQ em disciplinas introdutórias. Como dissemos anteriormente, dos 32 artigos capitaneados, apenas 11 deles relatam sobre seus resultados. Os autores identificaram 10 artigos que argumentam em favor da (dos): inserção da história e filosofia da ciência, como “porta de entrada” de uma adequada

reconstrução histórica; descrição conceitual dos experimentos de pensamentos, para uma discussão das questões filosóficas, epistemológicas e ontológicas sobre física quântica, a partir de questões históricas e controversas, como o EPR, o microscópio de Heisenberg; conceitos quânticos como uma ferramenta para melhorar a compreensão de professores em formação, sobre a natureza da ciência. Em geral, segundo os autores, essas obras tentam contextualizar a MQ em um quadro histórico e epistemológico atualizado, em oposição a uma abordagem histórica simplista, ajudando os alunos a reorganizar e melhorar seus conhecimentos. O restante dos artigos analisados articulam outros tipos de propostas para introdução de conceitos quânticos, que fogem dos objetivos propostos nesta tese.

Tendo em vistas os nossos objetivos, apenas dois trabalhos, que foram citados na revisão de Greca & Freire Jr., (2012), interessam a esta tese. São eles:

Kalkanis et al. (2003), durante entrevistas com futuros professores, constataram que os mesmos possuíam sérias concepções alternativas, ou seja, a maioria dos entrevistados apresentaram dificuldades em diferenciar as estruturas conceituais entre a Física Clássica e a Mecânica Quântica. Vejamos:

- A ideia dominante em suas respostas aponta que o mundo microscópico tem a mesma característica que o mundo macroscópico;
- Utilizam o raciocínio determinístico da Física Clássica para interpretar fenômenos quânticos;
- Os entrevistados parecem acreditar que os conteúdos científicos apreendidos durante as fases anteriores de estudo, apresentam-se “cientificamente corretos”;
- A maioria deles ignorou conceitos como “crise” na ciência, “mudança de paradigma” e assim por diante;
- O “modelo planetário” para o átomo de Bohr parece estar profundamente ancorado em seu sistema cognitivo, advindo do ensino secundário;
- Não conseguem relacionar um comportamento ondulatório para partículas (elétrons) no átomo.

Inicialmente, essas concepções encontradas nas entrevistas foram consideradas pelos pesquisadores como obstáculos conceituais à aprendizagem de determinados assuntos em MQ. Na etapa seguinte, esses investigadores elaboraram e avaliaram uma estratégia

educacional, utilizando o modelo atômico de Bohr, que permitiu formar uma estrutura conceitual diferente, entre Física Clássica e a Física Quântica, revelando o significado interno do princípio da complementaridade.

Nashon et al. (2008) consideram extremamente importante trabalhar o ensino de Física com aspectos de Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e acreditam que isso esteja sendo negligenciado nos currículos atuais dos cursos de formação de professores. Assim, através de aplicação de questionários, os autores constataram que a grande maioria dos professores (16 participantes) em formação de uma província do Canadá tem dificuldade para trabalhar com tópicos relacionados à MQ, devido à falta de interesse dos estudantes e ao fato de o tema ser considerado tedioso e de conteúdo abstrato. Assim, trabalharam com esses professores para a inserção de tópicos de CTS no ensino de MQ e, após análise dos dados coletados, os autores concluíram que tais professores consideram importante a utilização de CTS para desmitificar a Ciência, mostrando o seu lado humano. Na opinião dos professores que participaram do estudo, com um ensino baseado em CTS, o aluno pode ter uma verdadeira compreensão de como o conhecimento é estruturado, como se desenvolve e como pode ser aplicado.

Ostermann, F. & Pereira, A. (2009) promoveram uma revisão de mais de cem artigos sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea (FMC) e de MQ publicados nas mais importantes revistas de ensino de ciências² em nível nacional e internacional, no período de 2001 a 2006. Os autores classificaram os artigos em quatro grandes grupos, a saber: propostas testadas em sala de aula que apresentem resultados de aprendizagem; levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC; bibliografia de consulta para professores; e análise de publicações relacionadas ao ensino de FMC. Percebemos que mais da metade dos artigos analisados pelos autores estão inseridos no último grupo. Eles ainda salientam que há uma escassez de estudos sobre a formação inicial e continuada de professores dado que, de todos os trabalhos analisados, foram encontrados três trabalhos que tratam desse tema. Esses trabalhos encontram-se sequenciados abaixo. Após essa sequência, acrescentamos quatro outros trabalhos, que efetivamente são do nosso interesse.

Inicialmente, destacamos o trabalho de Euler et al. (1999), por ter sido o primeiro artigo a explorar a questão da compreensão de conceitos quânticos por estudantes de um Curso

² Segundo o Qualis da CAPES.

de Licenciatura em Física. A pesquisa foi realizada na Universidade de Kiel, envolvendo 13 alunos que já tinham tido contato, em outra disciplina específica, com a Mecânica Quântica (MQ). A pesquisa foi conduzida durante o envolvimento deles com uma última disciplina que explorava conceitos quânticos e suas nuances, antes que eles fossem ensinar em escolas secundárias.

Os pesquisadores aplicaram um questionário do tipo pré-teste aos 13 alunos, com o objetivo de resgatar suas concepções sobre conceitos quânticos. O que se observou foi que 10 desses alunos responderam ao pré-teste de forma clássica, usando argumentos da física newtoniana para responder, por exemplo, sobre o modelo atômico de Bohr. Dois desses alunos, responderam de forma híbrida, ou seja, usaram igualmente conceitos quânticos e clássicos, dependendo da questão. Apenas um dos alunos respondeu às questões com ideias consistentes com a MQ.

Nessa mesma linha de pesquisa, Ostermann & Ricci (2004) desenvolveram um trabalho junto a 18 alunos do Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no qual aplicaram um instrumento avaliativo, no sentido de realizar um levantamento sobre quais eram as noções básicas desses alunos em tópicos de MQ, já que a turma era constituída essencialmente de professores de Física do ensino médio, que já tinham cursado disciplinas desse nível em sua formação. Vários aspectos, na maioria dos resultados, apontam para lacunas importantes nos aspectos conceituais básicos da MQ, a saber:

- Desconhecimento dos fatos históricos, relativos à crise na Física Clássica, supostamente bem difundidos;
- Combinação de forma confusa, entre conceitos da MQ com conceitos da relatividade especial, deixando transparecer que concebem os objetos do mundo microscópico e quântico como automaticamente relativísticos;
- Desconhecimento das propriedades essenciais dos objetos clássicos e quânticos;
- Desconhecimento da natureza probabilística associada a objetos quânticos;

A partir desses resultados, os pesquisadores desenvolveram uma unidade conceitual de MQ, ao longo de seis encontros, destinada aos professores participantes do mestrado profissionalizante, que rompesse com a forma tradicional como são ministrados assuntos desse porte, na graduação e pós-graduação, na qual prevalece uma forte

conotação da abordagem semiclássica, no emprego do formalismo matemático em extensas listas de exercícios, em detrimento dos aspectos essencialmente quânticos. O pós-teste revelou ter havido uma melhora significativa na compreensão de aspectos conceituais básicos da MQ, mostrando-nos que a implementação da unidade conceitual voltada para esses aspectos, associada a atividades virtuais, efetivamente contribuiu para o bom desempenho dos alunos-professores. Apesar da tentativa de trabalhar nessa perspectiva, os pesquisadores reconhecem que, na elaboração dessa unidade, ainda se vislumbravam aspectos tradicionais, o que terminou por contaminá-la.

Ostermann & Ricci (2005) relatam a reestruturação e implementação de uma unidade didática conceitual sobre Física Quântica na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” em uma turma do Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O objetivo principal da disciplina consistiu na qualificação profissional de professores de Física do nível médio, na questão de compreensão aprofundada dos conceitos e das noções básicas de Física Quântica, sem a preocupação excessiva com o formalismo matemático. O foco do trabalho foi a descrição da nova versão da unidade conceitual, complementada por alguns resultados qualitativos obtidos com a reaplicação de um instrumento previamente construído para realizar levantamento de noções básicas sobre o tema. O desenvolvimento da unidade centrou-se no uso de novas tecnologias para o aprendizado significativo de conceitos centrais da Física Quântica. Na atividade foram utilizados dois softwares livres, do tipo “bancada virtual”, como recursos didáticos articulados a roteiros exploratórios, elaborados com a finalidade de promover mudanças nas concepções dos alunos-professores, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos. Além disso, os alunos realizaram uma atividade de leitura extraclasse dos oito primeiros capítulos do livro “Alice no país do quantum”, discutindo ao final seus principais conceitos.

De uma maneira geral, com a implementação da nova versão da unidade conceitual, os resultados apontam para um avanço em relação à abordagem tradicional, sinalizando para transposições didáticas possíveis da MQ para o ensino médio, sem a necessidade de apelar para analogias semiclássicas da “velha MQ”. Apontam ainda para muitos conceitos que antes foram interpretados de forma errônea, como, por exemplo, os objetos quânticos, que foram classificados como necessariamente relativísticos, o que foi totalmente eliminado, não se observando mais esses erros. O uso exploratório das

novas tecnologias (softwares), como recurso adicional às aulas e com roteiros exploratórios, constituiu-se em uma ferramenta adicional à aprendizagem dos alunos-professores, fugindo assim de abordagens mais tradicionais e promovendo mudanças significativas em suas posturas, como, por exemplo, ser capaz de inserir esses assuntos no ensino médio.

Em outro trabalho, Ostermann, F. et al. (2009) investigaram as concepções prévias de cerca de 14 estudantes do sétimo período do curso de Licenciatura em Física da UFRGS, que já haviam cursado duas disciplinas sobre Física Quântica, acerca da dualidade onda-partícula. Através de um questionário com 16 questões conceituais e objetivas, os licenciandos demonstraram seus conhecimentos sobre, basicamente, três assuntos experimentais que evidenciam o comportamento dual da matéria: o efeito fotoelétrico, o experimento da dupla fenda e o interferômetro de Mach-Zehnder. Seus resultados mostram que a maioria dos estudantes tem dificuldades em reconhecer em quais situações os objetos quânticos (fótons e elétrons) apresentam um comportamento tipicamente corpuscular ou ondulatório, apesar de todos terem demonstrado conhecimento acerca do comportamento dual dos fótons. Esses pesquisadores acreditam que essa falta de clareza é devida a uma constante e forte abordagem semiclássica utilizada nas disciplinas que versam sobre os fundamentos quânticos.

Pereira (2008) apresentou uma investigação sobre o ensino de Física Quântica na formação inicial de futuros professores, desenvolvida junto a uma disciplina do curso de Licenciatura em Física da UFRGS. Inspirado nos trabalhos de Muller & Wiesner (2002) e Pessoa Jr. (2003), Pereira (2008) utilizou, como atividade de ensino, o software que simula o interferômetro de Mach-Zehnder, cujo objetivo é mostrar interferências quânticas análogas ao experimento de dupla fenda. Durante as aulas, o uso do simulador trouxe à tona, como eixo central das discussões, o caráter quântico dos objetos microscópicos, enfatizando o conceito de dualidade onda-partícula. O foco da análise foram as tensões nos enunciados de estudantes, à luz do referencial sociocultural, procurando avaliar em que medida os enunciados dos estudantes se articulam à internalização de conceitos de Física Quântica com uso de instrumentos semióticos. Os resultados mostraram que as ações mediadas pelo uso do interferômetro virtual de Mach-Zehnder, como ferramenta cultural, auxiliaram os processos de compreensão por parte dos alunos, viabilizando a negociação, em sala de aula, de significados aceitos e compartilhados pela comunidade científica. Possibilitou ainda uma série de discussões

que possivelmente não seria levada a efeito em uma sala de aula de física quântica tradicional. Além disso, o autor mostra, através dos seus resultados, a necessidade de se abordar as diferentes interpretações da Física Quântica, antes da intervenção didática com software.

Barros & Bastos (2007) verificaram as mudanças que ocorrem nas concepções de licenciandos em Física, sobre difração de elétrons, quando utilizam o Ciclo da Experiência Kellyana. As cinco etapas desse Ciclo (antecipação, investimento, encontro, confirmação/refutação e revisão construtiva) foram distribuídas em dez reuniões, com duração média de duas horas cada, durante as quais foram acompanhadas as concepções dos alunos, desde as iniciais, detectadas através de um pré-teste, até as concepções mantidas ao término da intervenção didática, através de um pós-teste e de uma entrevista. Foram investigados, inicialmente, cinco alunos de Física Moderna e dez de Mecânica Quântica, do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, obtendo-se concepções sobre difração de elétrons semelhantes às descritas em pesquisas anteriores. As etapas posteriores do Ciclo da Experiência Kellyana foram aplicadas apenas a sete alunos de Mecânica Quântica, cujas concepções sofreram mudanças na direção de uma maior articulação entre as visões corpuscular e ondulatória da matéria, o que possibilitou uma compreensão menos fragmentada e mais significativa do assunto.

Rocha, C. R (2008) analisou a viabilidade de uma proposta pedagógica de curta duração curricular, para o ensino de tópicos de MQ, destinada a professores do ensino médio ou em formação, visando preencher lacunas em suas formações. Sob a luz dos referenciais teóricos da aprendizagem significativa de Ausubel e dos campos conceituais de Vergnaud, criaram-se situações-problema que pudessem promover a aprendizagem significativa dos tópicos apresentados em cada etapa da pesquisa. Constatou-se que as formulações do experimento de dupla fenda e do experimento de Stern-Gerlach chamaram a atenção dos alunos e se constituíram em bons exemplos de aplicação dos conceitos de estado de um sistema quântico, de superposição linear de estados, além de outros assuntos, que efetivamente facilitaram a compreensão de muitos desses conceitos. A inclusão de tópicos contemporâneos (Emaranhamento quântico e Criptografia quântica) motivou os alunos para o aprendizado dos primeiros princípios da MQ.

Assim, utilizando uma linguagem mais conceitual e fenomenológica do que matemática e sem recorrer à utilização de conceitos relativos à mecânica clássica para explicar esses fenômenos quânticos apresentados, Rocha, C. R (2008) concluiu que o ensino introdutório de MQ, idealizado a partir de situações-problema, apresentou-se como bons meios para a compreensão de alguns importantes conceitos quânticos. Paralelamente a esse tipo de metodologia, a utilização de simulações em computador se mostrou eficiente na “visualização” e na compreensão de determinados fenômenos discutidos.

Tomando como referência os trabalhos citados, nas duas revisões realizadas, verificamos que poucos trabalhos contemplaram a formação de professores, tanto em relação às dificuldades de aprendizagem de conteúdos quânticos, como também em relação às propostas, com resultados de aprendizagem, de cursos sobre os aspectos conceituais da MQ. De forma enfática, as concepções ou dificuldades apresentadas pelos estudantes, na maioria dos artigos analisados nas revisões descritas, apontam fortemente para uma falsa analogia entre a Física clássica e a quântica, denotando que esses alunos possuem ideias clássicas arraigadas em sua estrutura conceitual, usando-as inadequadamente para entender estruturas quânticas, gerando assim obstáculos epistemológicos. Em outras palavras, quando os estudantes têm a oportunidade de estudar a Física do século XX, começam analisando assuntos que usam uma abordagem semiclássica, para em seguida estudar assuntos estritamente quânticos, em que essa abordagem não funciona. Assim, na tentativa de formar uma imagem concreta de algo abstrato, terminam por abandonar o seu entendimento.

Outro aspecto que afasta a maioria dos alunos dessa compreensão, refere-se ao formalismo matemático, inerente à estrutura da MQ. O forte apelo por essa ferramenta em cursos de formação tem sido ponto principal da rejeição à disciplina de cunho quântico. Nesse sentido, professores de Física em exercício, ou em formação, não se sentem preparados para a sua inserção no ensino médio, uma vez que, ao invés de capitalizarem informações relativas aos aspectos conceituais, históricos e epistemológicos da teoria quântica, foram treinados ou aprimorados a serem capazes de responder às excessivas listas de exercícios, em que predomina a sua habilidade com os cálculos. Porém, como vimos, esse panorama tende a mudar, quando as disciplinas voltadas para a introdução da MQ, em cursos de formação de professores de Física, optam por propostas pedagógicas inovadoras, em que prevalecem os aspectos históricos e filosóficos concernentes às grandes controvérsias ao longo da consolidação da teoria e

de seus postulados quânticos, como o paradoxo de Schrödinger, os teoremas EPR e de Bell, bem como a sua comprovação experimental, entre outros. Paralelamente a essas propostas, verificamos também que outras, com o uso de simulações em computadores, de forma a tornar menos difícil a compreensão de estudantes relativa aos conceitos abstratos da MQ, surtiram efeitos desejáveis, abrindo assim um leque de possíveis opções para introdução de assuntos referentes à teoria quântica, nos cursos de formação em Física.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“As condições de medida constituem um elemento inerente a qualquer fenômeno ao qual o termo realidade física possa ser atribuído. Isso requer uma revisão radical de nossa atitude com relação ao problema da realidade física”.

Niels Bohr (1885 – 1962)

Considerando os objetivos de nossa tese, cabe, neste capítulo, fazermos um levantamento dos fundamentos teóricos, em relação a assuntos inerentes ao processo ensino-aprendizagem da disciplina de Mecânica Quântica (MQ), próprios à formação do licenciando em Física. Mesmo não tendo como objetivo aprofundar-se em nenhum dos temas apresentados, este capítulo levanta algumas discussões que estiveram, e ainda estão, na agenda da Física atual, bem como são discussões presentes na história e na filosofia da MQ. Um curso de Licenciatura em Física que chame a atenção para esses problemas, contextualizando os desenvolvimentos que foram e são realizados pela MQ e incluindo dentro desse quadro aspectos sobre os debates em torno de suas interpretações e de seus problemas de fundamentos, está, na ótica aqui adotada, oferecendo uma formação mais rica sobre a MQ. Assim sendo, não daremos atenção aos eventos que originaram a MQ, entre o final do século XIX e o início do XX, por entender que os mesmos não sinalizam para essa perspectiva.

A base teórica para esses fundamentos toma como referência os livros: Conceitos de Física Quântica, O Universo dos Quanta, The Quantum Challenge e David Bohm e a controvérsia dos quantas, que são livros que dão ênfases aos conceitos, às interpretações e às questões históricas e filosóficas da MQ. Além desses, utilizamos também alguns trabalhos de tese, em forma de artigos, citados em quatro densas revisões realizadas, aqui no Brasil: Ostermann e Moreira (2000); Greca e Moreira (2001), Ostermann e Pereira (2007) e Greca e Freire Jr. (2012).

3.1 Discussão dos conceitos fundamentais da MQ

A fundamentação teórica que faremos a seguir aponta para características próprias dos seus formuladores, levando em consideração determinados assuntos de MQ que pensamos ser essenciais à formação de licenciandos em Física. Desse modo, entendemos que outros fundamentos possam ser evidenciados, denotando que essa é uma área em que há diversos modos de conduzi-la, no sentido de torná-la menos ou mais técnica. Essa plausibilidade torna-se significativa, quando levamos em consideração não só os aspectos do seu ensino, que enfatiza o emprego do formalismo matemático³, abstrato por natureza, como principal recurso ou mesmo única ferramenta de aprendizagem (Ostermann; Ricci, 2004; Euler et al. 1999; Kalkanis et al. 2002; Greca; Herscovitz, 2002; Greca; Freire Jr., 2003), mas também, quando leva-se em consideração outros aspectos (histórico, filosófico, sociológico), além da sua própria epistemologia. Antes de adentrarmos nesse processo da fundamentação, faz-se necessário e prudente que façamos uma descrição de dois problemas, que entendemos serem cruciais para o bom entendimento desses fundamentos: O determinismo da Física Clássica e o indeterminismo da MQ.

I. O problema do determinismo na Física Clássica

O determinismo científico, através da Mecânica Clássica, desenvolvido por Galileu e posteriormente Isaac Newton, eliminou qualquer referência ao finalismo aristotélico, já que, dadas as leis das forças que regem um dado sistema, os acontecimentos resultantes são uma consequência automática das condições iniciais mensuráveis num dado instante de tempo. Assim, a Mecânica Clássica possibilitou um amplo esclarecimento das questões de causa e efeito. Associado a esses pressupostos, o progresso bem sucedido da Mecânica Clássica, baseado nessa visão determinista e causal, provocou uma profunda impressão em toda a Ciência contemporânea, objetivada pela existência real do mundo, da natureza e dos seus fenômenos previstos, discutidos e mensuráveis, independente do observador. Tudo é uma questão de determinismo, de causalidade; o universo obedece rigorosamente às leis causais. Essa é uma das famosas frases usadas por Laplace, muito comum nos livros de Física, no qual ele argumenta em favor do

³ Segundo Ostermann e Ricci (2005), refere-se a uma série de fórmulas que são postuladas e de outras que são derivadas das primeiras em acordo com regras lógicas, comparáveis aos experimentos. Mudam-se as interpretações, mas o conjunto de equações continua.

determinismo. No entanto, na escala atômica as coisas são muito diferentes e logo ficou evidente que as ideias clássicas da Mecânica e do Eletromagnetismo eram insuficientes para explicar a estabilidade observada nas estruturas atômicas.

II. O indeterminismo da Mecânica Quântica

A grande “confusão” que se estabeleceu entre 1925 e 1926, descrito por Max Jammer (1966, p. 196) como uma época de “uma triste miscelânea de hipóteses, princípios, teoremas e receitas de cálculos”, estabelecia estágios de verificação de problemas da Física Atômica, que envolviam a teoria clássica, mostrando que, naquela fase, a MQ não era autônoma nem coerente. O Princípio da Indeterminação, descrito nessa época por Heisenberg, leva-nos a pensar a respeito de que sempre existe uma interação não determinável entre o observador e o que é observado, pondo em contradição o determinismo. Assim, na formulação da lei causal, Heisenberg (1984) afirma que:

Se soubermos o presente exatamente, podemos prever o futuro – o que está errado não é a conclusão, mas sim a premissa. Nós não podemos, por uma questão de princípio, conhecer o presente em todos os seus detalhes (p.19).

Em outras palavras, diríamos que, a nível quântico, não é mais possível trabalharmos com relações de causa e efeito. Portanto, a MQ é não determinista, o que significa que ela geralmente não prediz a obtenção de qualquer medição com absoluta certeza. Ao invés disso, ela simplesmente nos informa a probabilidade de obter determinadas saídas.

Na MQ o indeterminismo é intrínseco ao problema da medida, ou seja, a nível microscópico a natureza é aleatória. Não há como, antes da medida, sabermos o resultado que virá, mesmo conhecendo todos os detalhes do problema (p.18).

Somente através do formalismo da MQ, desenvolvido pelos esforços conjuntos de toda uma geração de físicos teóricos a partir da proposta do *quantum* de ação por Planck em 1900, é que se conseguiu uma descrição detalhada de uma imensa quantidade de dados experimentais referentes às propriedades físicas e químicas da matéria. Apesar dessa informação, sabemos que experiências recentes, como as desenvolvidas por A. Aspect e seus colaboradores, na França, têm mostrado que é possível deduzir os efeitos fotoelétrico e Compton, sem o conceito de fóton.

O formalismo quântico, segundo Bohr (1995), não admite as interpretações pictóricas a que estamos acostumados no nosso cotidiano ou nos moldes habituais da Física Clássica; ele tem o objetivo direto de estabelecer relações entre as observações obtidas em condições bem definidas. Como, num dado arranjo experimental, diferentes processos quânticos individuais podem ocorrer competitivamente, essas relações são de caráter intrinsecamente probabilístico, e não determinístico, como em toda a Física Clássica. Nesse contexto, fala-se às vezes em “perturbação dos fenômenos pela observação”. O reconhecimento de que a interação entre os instrumentos de medida e os sistemas físicos investigados constitui uma parte integrante dos fenômenos quânticos, não só revelou uma limitação da concepção mecânica da natureza, como também nos forçou a prestar a devida atenção às condições de observação. Na verdade, a Mecânica Quântica parece ter elevado a observação a um novo status, no sentido de que temos de admitir que não existe realidade sem observador, ou seja, existe uma unidade indissolúvel entre o observador, seus instrumentos de medida e o objeto observado.

Sobre a descrição desses problemas, pesquisas (Ostermann; Ricci, 2004; Kalkanis et al. 2002; Greca; Freire Jr., 2012) têm nos revelado que a quase totalidade dos professores em formação desconhecem esses fatos históricos, relativos à crise ou ruptura na Física Clássica, apesar de supostamente bem difundidos. A maioria dos estudantes pesquisados é inserida na Física Moderna via disciplinas que associam assuntos clássicos aos quânticos (radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e modelo atômico de Bohr) e, com isso, não reconhecem em quais situações os objetos quânticos (fótons, elétrons, prótons e outras partículas) se comportam tipicamente como partícula ou como onda, apesar de todos os alunos pesquisados terem demonstrado conhecimento acerca do comportamento dual dos fótons. Ao serem submetidos a outros assuntos que versam sobre os postulados quânticos, não conseguem dissociar-se do raciocínio determinista que estavam usando de forma híbrida, e, assim, não apresentam uma compreensão conceitual satisfatória do novo contexto em que estão sendo inseridos. Ao contrário, são incentivados aos aspectos matemáticos da nova teoria, em oposição aos aspectos fenomenológico-conceituais⁴ e interpretativos⁵ inerentes ao próprio formalismo.

⁴ Segundo Greca et al. (2001), uma abordagem é dita fenomenológica quando é capaz de propiciar uma compreensão natural, intuitiva, dos fenômenos quânticos; é dita conceitual na medida em que os fenômenos escolhidos devem ser suficientemente simples e dirigidos de forma a que a essência semântica dos primeiros conceitos se torne evidente.

3.2 Interpretações da Mecânica Quântica

Segrè (1987) nos mostra que a base formal da MQ iniciou-se na década de 1920, entre 1925 e 1926, sendo desenvolvida a partir de três tipos de formulações matemáticas diferentes (matricial de Heisenberg, Born e Jordan, ondulatória de Schrödinger e algébrica de Dirac), sendo que todas são consistentes com os resultados teóricos e experimentais. Para cada um desses formalismos matemáticos, leis e postulados da teoria quântica, há várias interpretações que lhes são consistentes. Segundo Pessoa Jr. (2003) existem dezenas de interpretações diferentes da Teoria Quântica, e todas elas buscam uma representação ou uma imagem compreensível do mundo microscópico, mostrando-nos que esse pluralismo de interpretações é um passo importante na superação de ideias que tomam as ciências em geral, e a Física em particular, como um corpo de conhecimento inquestionável, pronto, isento de críticas. Todas essas interpretações, portanto, têm pontos comuns de referências filosóficas, a saber: o determinismo, a localidade, a dualidade e a realidade.

Com o advento da MQ, a concepção de um universo completamente determinado foi afastada, tomando como base, uma natureza mais probabilística⁶, na qual prevalecem limitações que nos são impostas. Assim, dentre as várias soluções filosóficas, inseridas nas interpretações atualmente existentes, tomaremos como referência a mais positivista de todas: Interpretação Ortodoxa ou de Copenhague.

Por que escolhemos essa interpretação? Apesar do intenso debate em torno da melhor forma de interpretar a MQ, a escolha dessa interpretação deu-se em função da sua ampla utilização no ensino, nos meios acadêmicos, na divulgação da MQ e nos livros didáticos utilizados nos cursos de Física, além de sua trajetória histórica e sua consistência conceitual e experimental, que permeia a comunidade científica há quase cem anos. No entanto, essa divulgação só ocorre com ênfase nos seus aspectos não conceituais, primando muito mais por seus postulados matemáticos, eficazes para a previsão de resultados experimentais, mas que não exige uma reflexão mais acentuada das suas leis, contida nos seus postulados, necessária à compreensão das características quânticas dos

⁵ Segundo Pessoa Jr. (2003), refere-se a um conjunto de teses que se agrega ao formalismo mínimo de uma teoria científica, e que em nada afeta as previsões observacionais da teoria. Ajuda-nos a conduzir nosso trabalho teórico por um caminho mais aceitável.

⁶ A probabilidade pensada para os objetos quânticos é diferente da probabilidade usada no mundo macroscópico.

sistemas microscópicos. Paralelamente a essa negação, pertinente nos cursos de graduação e pós-graduação, Freire Jr. e Greca (2010) nos sinalizam que esse predomínio teria começado e fortemente utilizado no pós-segunda guerra, em especial nos EUA, e que nos foi legado, empobrecendo o alcance dessa ciência no aspecto teórico.

No entanto, entendemos que, associar outras interpretações às explicações das leis e postulados da MQ, como por exemplo, a visão ondulatória de Schrödinger e a dupla solução de De Broglie, não no sentido de polemizar, mas muito mais em mostrar que não deve haver um domínio de uma única visão do mundo quântico, deverá oferecer aos professores de Física em formação, uma contribuição mais crítica, menos formalista e, por que não dizer, menos positivista. Em pesquisa recente, Greca e Freire Jr. (2012), relataram que, dentre os 32 artigos por eles pesquisados, apenas 10 referem-se à existência de diferentes interpretações e, dentre esses artigos, oito se afastam da posição epistemológica da interpretação de Copenhague, dando um caráter mais objetivo para o conceito de estado de um sistema quântico e, portanto, menos dependente do processo de medição. Diante dessa premissa, esses pesquisadores acreditam que esse tipo de interpretação parece ser a mais aceita por pesquisadores de ensino de ciências, como a melhor opção como estratégia didática para o ensino dos aspectos conceituais e filosóficos da MQ.

I. Interpretação do Instrumentalismo mínimo

O formalismo da MQ foi estruturado, inicialmente, pela mecânica matricial de Heisenberg, em 1925. Em 1926, Schrödinger publicou um trabalho no qual lançou um segundo formalismo, inspirado no trabalho de Louis de Broglie, chamado de Mecânica Ondulatória. O passo seguinte, no final de 1926, após a prova de que esses dois formalismos eram equivalentes, Dirac unificou e generalizou-os, a partir da Teoria da Transformação. Para o presente subitem, usaremos dois desses formalismos, o de Schrödinger e o de Dirac, no sentido de apresentar alguns enunciados, de forma resumida, que envolvem os conceitos quânticos, essenciais a um curso de MQ.

Tomaremos como referência o livro “Conceitos de Física Quântica, vol. 1” de Osvaldo Pessoa Jr (2003), além das notas de aulas de um curso oferecido pelo Professor Dr. Aurino Ribeiro, na UFBA. Ambos ressaltam a necessidade da relação entre o formalismo mínimo e a realidade física, mantendo uma posição de prudência diante do papel que as teorias científicas assumem na descrição do mundo. A ponte para essa

realidade é feita através de um núcleo comum ou “regras de correspondências”, a partir do qual as interpretações passam a existir de acordo com a filosofia de cada cientista.

Em toda teoria física existe um conjunto de postulados ou princípios, a partir dos quais decorrem consequências que devem estar sintonizados com os fenômenos naturais e os fenômenos experimentais observados. Assim, abaixo, descrevemos os primeiros princípios da MQ, para um sistema microscópico isolado. Uma boa compreensão dos seus conceitos fundamentais faz-se necessário, no sentido de evitarmos suas interpretações e utilizações de forma errônea. Vejamos:

- As leis fundamentais da MQ devem ser expressas através de uma função de onda que satisfaz uma equação linear, na qual toda informação obtida do sistema quântico está nela contida (Postulado de Definição);
- Todos os resultados físicos devem ser calculados com a ajuda de observáveis, também chamados de operadores lineares (energia, momentum, posição, spin,...) (Postulado de Definição);
- Todo observável é claramente definido quando a função de onda é uma autofunção do operador correspondente (Postulado de Definição);
- Quando a função de onda não é uma autofunção do operador, o resultado de uma medição não pode, então, ser determinado a priori (Postulado de Definição);
- Não existem funções de onda que sejam autofunções simultâneas de todos os operadores significativos para um dado problema quântico (Postulado de Definição);
- O quadrado da função de onda é a densidade de probabilidade de se encontrar um objeto quântico em um ponto quando se mede sua posição (Algoritmo Estatístico);
- O quadrado dos coeficientes de expansão da função de onda são as probabilidades de se medir o autovalor dessa função (Algoritmo Estatístico);
- A evolução temporal da função de onda é linear e determinista, sendo regida pela equação de Schrödinger dependente do tempo (Evolução Linear).
- Quando um objeto quântico é submetido à observação, através da medida de uma característica dinâmica (observável), a função de onda se reduz (colapsa) a uma das componentes da expansão da mesma, tornando-se autofunção do operador que representa o observável (Postulado da Projeção).

Como podemos perceber, o carro chefe da MQ é a função de onda, sendo que ela tem significado apenas no contexto da equação de Schrödinger, não relativística. Todas essas regras básicas e postulados são normalmente usados para se fazerem cálculos quânticos, podendo ser comparados com experimentos. O destaque desse formalismo é a equação de Schrödinger, que determina a evolução temporal da função de onda $\psi(x)$ associada a objetos quânticos, permitindo-nos entender, em situações concretas, por exemplo, o comportamento dos semicondutores e do laser.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = - \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)]\psi(x)$$

O aspecto discreto da Teoria Quântica surge agora naturalmente das condições de contorno impostas à equação de onda, e não de uma condição de quantização. A Mecânica Ondulatória confere claramente um significado físico à função de onda $\psi(x)$. Ela é o descritor dos objetos quânticos, contendo todas as informações físicas a respeito do estado do sistema que descreve, ou seja, podemos identificá-la como o próprio estado do sistema quântico, pois é ela que define completamente o estado do sistema quântico correspondente.

Em meados de 1926, Max Born aplicou a Mecânica Ondulatória numa teoria de perturbação para a colisão entre um elétron livre e um átomo, encontrando uma solução assintótica, denominada por aproximação de Born. Questionando-se sobre o significado da função de onda, concluiu que sendo a função ψ quadraticamente integrável, era submetida à condição de normalização:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

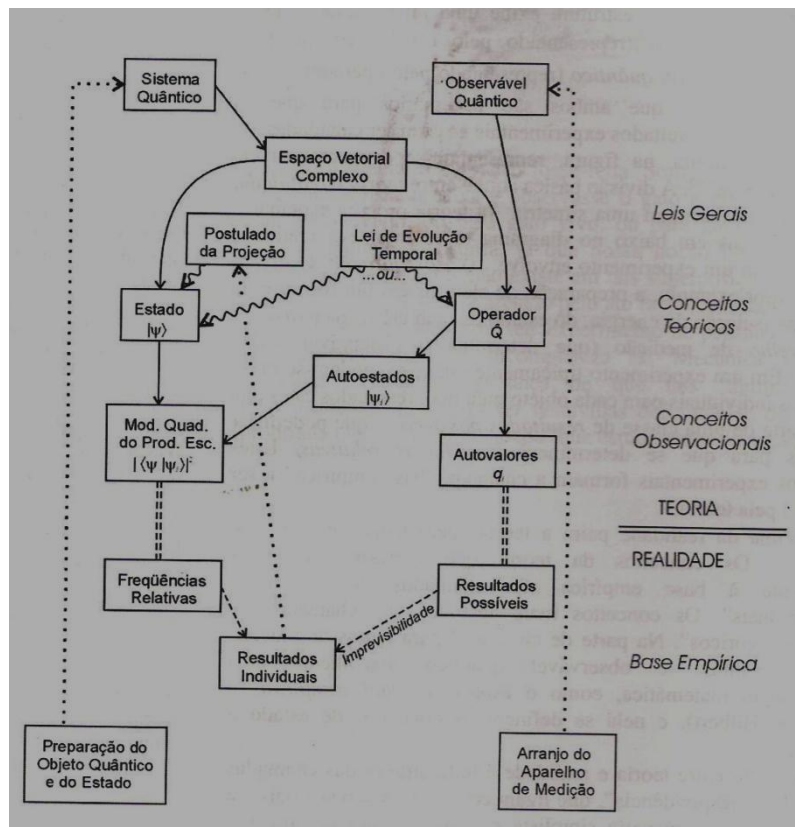
Com sua interpretação, Born conseguiu relacionar a função de onda com a probabilidade (ondas de probabilidade) de localização dos objetos quânticos. Isso significa que as soluções da equação de Schrödinger não fornecem trajetórias e nem descrevem a propagação de algo material, como ocorre nas ondas clássicas, mas tão somente a probabilidades de localização dessas partículas. Trata-se de um conceito muito abstrato e por isso causou a primeira grande fonte de desconforto na época, traduzindo-se num problema conceitual e filosófico da MQ, pois, dessa maneira, no mundo quântico, o determinismo deveria ser abandonado.

O princípio da superposição linear, tido como o postulado zero da MQ (Greca et al. 2001), pode servir como exemplo dessa interpretação. Como diria Dirac (1958, p.27), “... a maior diferença entre a mecânica clássica e a mecânica quântica, decorre do princípio de superposição de estados”. Essa diferenciação resulta do fato de que as superposições com ondas clássicas ocorrem em função da soma ou diferença de suas amplitudes, gerando interferências do tipo construtiva ou destrutiva, respectivamente. Já para a MQ, um ou mais objetos quânticos em uma superposição ou combinação linear normalizada de dois ou mais possíveis estados do sistema, no tempo (t), é ela própria um possível estado do sistema, no tempo (t).

Com essa constatação, fica patente a natureza completamente diversa da MQ em relação à Mecânica Clássica. Enquanto na Mecânica Clássica vale o determinismo, na MQ, segundo a interpretação ortodoxa, embora seja possível conhecer um estado completamente, todavia, seremos incapazes, em geral, de predizer o resultado de um experimento, para medir uma dada observável com certeza. Isso nos leva a concluir que, a observação de um fenômeno físico no mundo microscópico implica em uma interação entre o aparelho de medida e o sistema observado, que perturba profundamente a própria experiência e os seus resultados, ou seja, realizar uma medição causa uma mudança incontável na função de onda. Portanto, os observáveis associados aos operadores não comutativos, não podem ter para um mesmo estado, valores determinados.

A segunda abordagem segue outra linha de pensamento, preconizada por Pessoa Jr. (2003), usando o espaço vetorial complexo de Hilbert, de dimensão finita, seguindo o texto original de von Neumann e dando ênfase aos postulados fundamentais. Vejamos:

- Esboço estrutural da Teoria Quântica:



(Figura 01. Pessoa Jr., 2003, p. 64)

O esboço acima mostra, inicialmente, uma simetria entre o *sistema quântico*, representado pelo *estado* $|\psi\rangle$ e o *observável quântico*, representado pelo *operador* $\hat{Q}$. Ambos são necessários para que as *probabilidades* de resultados experimentais possam ser calculadas. O esboço é dividido em duas partes, *teoria* e *realidade*. A ponte entre essas duas partes, segundo Copenhague, é feita a partir da “regra de correspondência”, ligando a *base empírica* aos *conceitos observacionais*. Observa-se, também, que essa ponte pode ser chamada de “interpretação da teoria”.

- Realidade – refere-se à *realidade física* em um experimento. Por sua vez, ela se subdivide em duas modalidades:
 - ✓ A preparação do *objeto quântico* e de seu *estado*;
 - ✓ O arranjo do *aparelho de medição*, que determina o observável sendo medido.

Em um experimento tipicamente quântico, podem-se obter *resultados individuais* para cada *objeto quântico*, que fazem parte de uma classe de *resultados possíveis*, e que podem ser compilados para que se determinem as *frequências mínimas*. Esses

resultados experimentais formam a chamada “*base empírica*” a ser explicada pela teoria.

- Teorias – devem explicar dois tipos de conceitos:
 - ✓ Conceitos observacionais – são ligados diretamente à base empírica;
 - ✓ Conceitos teóricos – são os mais abstratos, ligados ao sistema quântico e observável quântico. Ambos são definidos a partir do espaço vetorial de Hilbert.

Os *conceitos observacionais* são relacionados através de leis empíricas. Já os princípios da Teoria quântica envolvem *leis gerais* que relacionam *conceitos teóricos* ou leis empíricas. Há dois tipos de leis que regem a transformação de um *sistema quântico*. A lei de *evolução temporal* é a equação dinâmica que rege um sistema fechado, enquanto nenhuma medição esteja sendo feita. O exemplo clássico desta lei é a equação de Schrödinger, que rege a *evolução temporal de estados*, enquanto que os *operadores* não se alteram. Porém, é possível considerar que os operadores evoluem no tempo, enquanto que o estado não se altera (Heisenberg).

A outra lei que descreve a transformação do sistema é o *postulado da projeção*, que se aplica apenas para o ato da medição. Após uma medição, conforme o resultado individual obtido (em geral imprevisível) calcula-se com esse postulado o novo estado do sistema. A partir do *operador* podem-se calcular *autovalores* e *autoestados*. Os primeiros correspondem aos *resultados possíveis* de uma medição, ao passo que $|\langle \psi | \psi \rangle|^2$ corresponde às *frequências relativas* obtidas em laboratório, para cada resultado possível.

II. Interpretação de Copenhagen

Historicamente a partir de 1925⁷, segundo Kragh (1999, p.206), um pequeno grupo de Físicos (Heisenberg, Born, Wigner, Jordan, Rosenfeld, Dirac e outros) liderados por N. Bohr, ocupou-se com o desenvolvimento e o entendimento da Teoria Quântica. Esse desenvolvimento se polarizou entre as visões realistas (acreditam na existência do mundo externo, independente do conhecimento que dele temos), como a de Einstein, De Broglie e Schrödinger, e visões mais positivistas (os objetos quânticos não têm

⁷ Intencionalmente, não abordaremos aqui, o rico desenvolvimento ocorrido antes dessa data.

existência independente do observador ou instrumento de medida), como a de Bohr e Heisenberg, que terminou por ser predominante entre eles. Se por um lado tínhamos uma teoria que exigia uma forma de pensar que limitava o uso simultâneo de certos conceitos da Física clássica quando aplicados ao mundo quântico, introduzindo o conceito de probabilidade de uma maneira essencial, por outro, tínhamos os que resistiam a essa visão probabilística, esperando algo mais determinista.

Vale acrescentar que o nome “Interpretação de Copenhague” refere-se ao fato de ter sido no Instituto de Física em Copenhague (Dinamarca) – Instituto Niels Bohr -, onde a maioria das discussões sobre a Teoria Quântica ocorreu. No entanto, não há registros de que Bohr, durante suas palestras, tivesse se referido a ela. Pelo contrário, referia-se sempre à Interpretação da Complementaridade. Segundo Folse (1985, p. 19), há uma tendência dentro da MQ em tornar o princípio da Complementaridade comum à interpretação de Copenhague. Para ele, Bohr nunca usou a frase “Interpretação de Copenhague” e por isso não faz sentido torná-las comuns. Parece ser aceitável tal afirmação, pois como nos relatam Osnaghi et al. (2009), algo parecido com esse conflito está expresso numa carta de Leon Rosenfeld para Frederik Belinfante, que diz:

Não somente [...] é fútil falar de duas escolas de Copenhague; mas é mesmo errado falar de uma escola de Copenhague; nunca existiu algo desse tipo e espero que nunca exista. A única distinção está entre físicos que entendem a mecânica quântica e aqueles que não a entendem (p.97).

Certamente, não cabe aqui, neste capítulo, verificarmos as razões históricas ou filosóficas existentes, que levem a uma distinção ou não, entre os termos interpretação de Copenhague e o Princípio da Complementaridade. Entretanto, segundo Folse (1985, p.19) parece razoável que essa distinção ocorra no sentido de que a interpretação de Copenhague da Teoria Quântica envolve lições extraídas da complementaridade, baseia-se, adicionalmente, em outros princípios físicos que não devem ser considerados como partes do quadro da complementaridade.

Assim, em setembro de 1927, numa conferência internacional de Física, em Como (Itália), em homenagem aos 100 anos da morte de A. Volta e, posteriormente, em outubro de 1927, durante o V congresso de Solvay, em Bruxelas, a interpretação da Escola de Copenhague foi apresentada, a partir do Princípio da Complementaridade, sugerida por Bohr, aliada ao Princípio da Incerteza ou Indeterminação de Heisenberg e à regra probabilística de Born, impondo-se de vez e mantendo-se hegemônica até a

década de 1950. Durante essas palestras, Bohr (2011) anunciou o Princípio da Complementaridade, enfatizando que os conceitos de Física Clássica são limitados para descrever os fenômenos atômicos, uma vez que, no mundo atômico, há uma descontinuidade essencial, simbolizada pelo quantum de ação de Planck.

... [o quantum de ação] força-nos a adotar um novo modo de descrição designado de complementaridade no sentido de que qualquer dada aplicação dos conceitos clássicos proíbe uso simultâneo de outros conceitos clássicos os quais em uma diferente conexão são igualmente necessários para a elucidação do fenômeno (Greenstein; Zajonc, 1997, p.84).

Durante esse período, essa interpretação sofreu várias tentativas de provar a sua “incompletude”, sendo que as mais famosas foram as evidenciadas pelos físicos Einstein, Podolsky e Rosen (EPR), em 1935, criticando o seu caráter não determinístico, e a interferência quântica de objetos macroscópicos, proposta por Schrödinger, a partir do seu famoso paradoxo do gato. Durante os congressos de Solvay, em 1927 e posteriormente em 1930, Einstein opõe-se à complementaridade de Bohr e à condição da “exclusividade mútua”, a partir de dois experimentos do pensamento. Suas controvérsias se resumiam em dois pontos:

- A manutenção do determinismo;
- A preservação de uma imagem nítida dos fenômenos físicos representados no espaço-tempo.

Bohr não concordava com esses argumentos, acrescentando que a Física Clássica é apenas uma generalização da MQ, ou seja, ela é necessária para comunicar os resultados da MQ. Seguindo esse raciocínio, Heisenberg argumentou que a interpretação de Copenhague da MQ começa por um paradoxo. Ela começa pelo fato de que descrevemos nossos experimentos apoiados nos conceitos da Física Clássica e, ao mesmo tempo, do conhecimento de que esses conceitos não se ajustam à natureza de maneira precisa.

Nessa fase, parecia não haver um acordo completo entre os integrantes da Escola de Copenhague sobre as teorias quânticas apresentadas, notando-se entre eles, posicionamentos conflitantes. De fato, durante uma palestra sobre a

Complementaridade, apresentada por Heisenberg em Leipzig, em 1928, ele declarou que:

A descrição causal de um sistema é complementar para a descrição do espaço-tempo, pois para se obter essa descrição é preciso observá-lo, e essa observação perturba o sistema. Se o sistema é perturbado, não podemos mais seguir sua conexão causal de uma forma pura (Heisenberg, 1984, p. 26-27).

Como podemos perceber, a interpretação dada por Heisenberg à Complementaridade, tendo como centro de divergência a causalidade, era diferente da explicação dada por Bohr, terminando por reinterpretar a descrição causal da MQ em termos da evolução determinista da função de onda de Schrödinger.

A partir da década de 1950, duas outras interpretações foram formalizadas, opondo-se à Teoria Quântica proposta por Bohr: Bohm, propondo uma teoria não local de variáveis escondidas para MQ, a partir das ideias de De Broglie, e Everett, introduzindo a interpretação de vários mundos. Ambos criticaram o abandono do determinismo e as propriedades bem definidas no domínio quântico. Segundo Greca e Freire Jr. (2012), apesar dessas críticas oposicionistas à interpretação de Copenhague, o crescente número de interpretações alternativas à MQ, e com elas, uma quantidade significativa de pensadores e pesquisadores, como Einstein, D. Bohm e outros, não se sentiram confortáveis com a base não realista dessa interpretação, ela jamais foi colocada em xeque por algum resultado experimental, ao contrário, ela tem se mantido coerente e consistente com os resultados experimentais mais recentes, a exemplo da interferometria com nêutrons.

Vejamos um trecho de Heisenberg em defesa da interpretação de Copenhague, que, a nosso ver, revela a relação entre o observador, o fenômeno atômico, o aparelho de medida e a teoria, relação que permite que façamos perguntas à Natureza:

"... o trabalho de pesquisa em física atômica é usualmente o seguinte: desejamos entender certo fenômeno, queremos reconhecer como esse fenômeno decorre das leis gerais da natureza. Portanto, aquela parte da matéria, ou de radiação, que toma parte no fenômeno, é o “objeto” natural no tratamento teórico e deveria ser separado, nesse sentido, dos instrumentos utilizados no estudo do fenômeno. Isso de novo realça o elemento subjetivo na descrição dos eventos atômicos, pois o instrumento de medida foi construído pelo observador, e temos que nos lembrar de que aquilo que observamos não é a natureza em si, mas, sim, a natureza exposta ao nosso método de questionar. Nosso trabalho científico, em Física, consiste em fazer perguntas sobre a natureza, usando a linguagem que possuímos e tentando conseguir as respostas por via experimental, com os meios de que dispomos. Dessa maneira, a teoria quântica nos faz

lembrar, como disse Bohr, de uma sabedoria muito antiga segundo a qual - na procura da harmonia da vida - jamais deveremos esquecer que, no drama da existência, somos ao mesmo tempo atores e espectadores. É compreensível que, em nosso relacionamento científico com a natureza, nossa própria atividade torne-se muito importante quando temos que lidar com partes da natureza onde só podemos penetrar fazendo uso das mais elaboradas ferramentas" (1984, p.85).

Resumidamente, entendemos que o principal objetivo dessa interpretação é mostrar que a MQ não faz afirmações sobre coisas autônomas e todos os seus enunciados se referem a situações experimentais. O objeto físico não tem existência independente de um observador; existe uma unidade indissolúvel entre observador, seus instrumentos de medida e o objeto observado.

Passamos agora a explicitar alguns pontos importantes dessa interpretação:

a) Princípio da Complementaridade

De acordo com Freire Jr. (1999), a expressão “Complementaridade” surge para dar um novo significado à descrição de duas representações: o espaço-tempo e as leis de conservação (momento e energia), do ponto de vista quântico. Se para os sistemas clássicos essas representações são simultâneas, combinadas e causais, para o sistema quântico elas são mutuamente exclusivas. Percebe-se aqui a diferença entre o mundo clássico e o quântico. No mundo quântico, há limitações à simultaneidade, postulada a partir do quantum de ação (h).

A partir desse postulado quântico, entendemos que os objetos quânticos⁸ podem se apresentar ao observador como onda ou como partícula, dependendo da situação experimental delineada pelo observador. Essa premissa, a mais importante no contexto da Complementaridade, pode ser evidenciada a partir dos experimentos da dupla fenda (figura a seguir) realizados com fótons ou com elétrons. Entretanto, todas as vezes que experimentalmente é buscado demonstrar essas duas características para um único objeto quântico, verifica-se a impossibilidade de observar a natureza dual do objeto em questão, no mesmo arranjo experimental. Nesse caso, é dito que as duas características são mutuamente excludentes, mas complementares, da natureza.

⁸ Objetos microscópicos com massa (elétrons, prótons, moléculas, etc.) e sem massa (fótons).

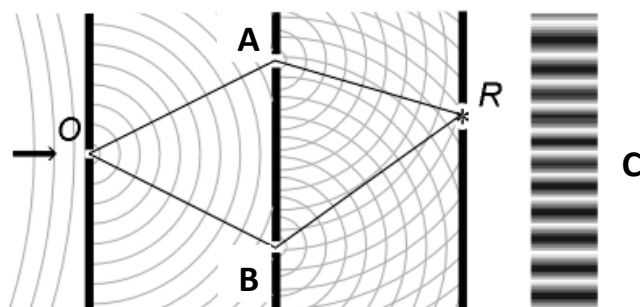


Figura 02 – Pessoa Jr., 2003, p. 45.

A figura lembra-nos que a detecção de vários pontos na tela (**R**), após as fendas **A** e **B**, indicam a chegada do objeto quântico lançado e que após algum tempo, formam um padrão de interferência, conforme a figura (**C**), relativa ao modelo ondulatório. Por outro lado, isso sugere que o objeto corresponda a uma partícula, que segue uma trajetória bem definida. Mas por qual fenda teria passado essa partícula? Para Bohr não faz sentido esse tipo de pergunta. Esse é um fenômeno tipicamente ondulatório, e, portanto, não faz sentido atribuir uma trajetória ao objeto detectado; ele passa por ambas as fendas, se espalhando como uma onda. Nunca saberemos por onde o objeto passou e se tentarmos verificar isso, destruiremos o padrão de interferência formada na tela e teremos apenas um ponto localizado, com característica corpuscular. Nunca os comportamentos, ondulatório e corpuscular, existirão ao mesmo tempo. Eles coexistem, se complementam, mas são excludentes para uma mesma experiência.

Não podemos ligar a MQ a dados experimentais sem utilizar alguns esquemas de interpretação, e a interpretação depende da teoria e da filosofia com que encaramos os dados. Portanto, valem as seguintes premissas filosóficas para a Complementaridade:

- Os fenômenos quânticos são aleatórios, imprevisíveis e únicos;
- Não se pode atribuir qualquer propriedade a um objeto quântico antes que essa propriedade seja efetivamente observada;
- Certas propriedades dos objetos quânticos não podem coexistir; ao se tentar introduzir uma propriedade nova, propriedades antes adquiridas podem ser destruídas;
- Um experimento só pode ser compreendido a partir de um comportamento corpuscular ou ondulatório, nunca os dois ao mesmo tempo.

De uma forma mais ampla, o princípio da Complementaridade proposto por Bohr propõe que a determinação dos atributos dos objetos quânticos, do tipo posição e momento, far-se-á com alguma indeterminação e compreendemos esses objetos de maneira complementar, ou seja, a descontinuidade e os saltos quânticos – como, por exemplo, o colapso de um pacote de ondas que se espalham quando sob observação – são considerados como aspectos fundamentais do comportamento dos objetos quânticos. A inseparabilidade é outro aspecto da Mecânica Quântica. Falar em objeto quântico sem falar sobre a maneira como o observamos é ambíguo, porque os dois são inseparáveis. Quando lidamos com macro-objetos, os prognósticos da MQ correspondem aos da Física Clássica. Assim podemos suprimir efeitos quânticos como probabilidade e descontinuidade no macro domínio da natureza, que percebemos diretamente com nossos sentidos.

b) Princípio da Incerteza de Heisenberg

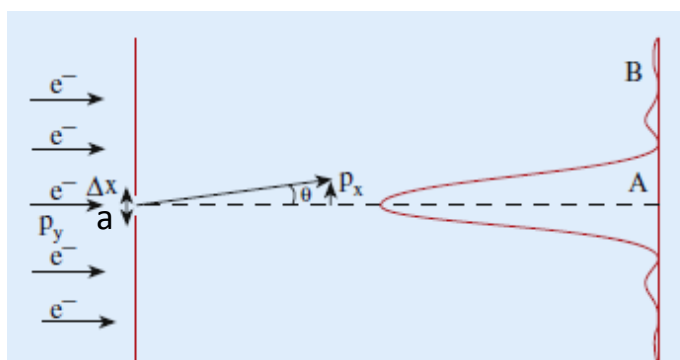
No mesmo ano em que Bohr lançou os fundamentos da Complementaridade, Heisenberg anunciou o Princípio da Indeterminação ou Incerteza. Segundo Pessoa Jr. (2003), há uma distinção entre essas duas grandezas: a Indeterminação refere-se a uma indefinição intrínseca do objeto e a Incerteza refere-se a uma ignorância do observador com relação a uma propriedade bem definida do objeto. Na Física Clássica, o movimento de um corpo é determinado pelas forças que o governam. Uma vez que conhecemos as condições iniciais (a posição e a velocidade do corpo em algum instante inicial do tempo), podemos calcular sua trajetória precisa, usando as equações de movimento de Newton. A Física Clássica, dessa maneira, leva à filosofia do determinismo a ideia de que é possível prognosticar inteiramente o movimento de todos os objetos materiais. O Princípio da Incerteza vem para questionar a filosofia do determinismo clássico.

De forma tradicional, sua elaboração parte do princípio segundo o qual se fizermos uma medição sobre um objeto quântico, determinando seu momento (p_x), com uma incerteza (Δp_x), não se pode, simultaneamente, conhecer a componente (x) da posição com incerteza (Δx) menor do que $h/\Delta p_x$, sendo h a constante de Planck. Essa mesma indeterminação vale para a relação entre energia e tempo, sendo impossível determinar com a mesma precisão, simultaneamente, o instante de tempo de uma partícula e a energia que ela possui. Em um mesmo estado quântico, é impossível ter-se valores

definidos para duas grandezas conjugadas, como as que anteriormente. Trata-se de uma impossibilidade intrínseca à natureza dos sistemas quânticos. É aqui que a MQ rompe definitivamente com a Física Clássica.

Para uma discussão qualitativa do Princípio de Heisenberg, Johansson e Milstead (2008) propõem que se faça a análise de um experimento de pensamento, usando a difração de objetos quânticos (fótons, elétrons, prótons, etc) por fenda simples para demonstrar os seus efeitos e mostrar que ele não é nada mais que a dualidade onda-partícula vista sob uma perspectiva diferente. Além do mais, com esta abordagem (descrita abaixo) há pouca matemática nova a ser considerada, ideal para ser trabalhada no Ensino Médio.

Suponhamos que se tenha uma fonte de elétrons, semelhante ao canhão de elétrons de um tubo de raios catódicos, produzindo um feixe de elétrons com aproximadamente a mesma velocidade, no mesmo sentido e com o mesmo comprimento de onda de De Broglie, incidindo sobre uma fenda com abertura (a) e posteriormente sobre uma placa fotográfica, conforme a figura abaixo:



O gráfico ao lado nos mostra o grau de exposição da placa fotográfica, que em qualquer região é proporcional ao número de elétrons que incidem na referida região. Indicamos os componentes do momento linear de um elétron que atinge a extremidade superior do máximo central, formando um ângulo θ com a horizontal.

Figura 03 – Young e Freedman, 2004, p.223.

A fonte deve estar afastada o suficiente para permitir que os elétrons cheguem perpendicularmente à fenda, de modo que se possa determinar o momento na direção horizontal ($p_x = p$) e na vertical ($p_y = 0$). Portanto, conhecemos o momento na direção vertical, com uma precisão ($\Delta p_y = 0$), mas não se sabe onde os elétrons estão. Para os elétrons que passarem pela fenda, poderemos dizer que conhecemos a sua posição com uma precisão aproximadamente da ordem do tamanho da fenda, ou seja, $\Delta y = a$. Quando os elétrons passarem pela fenda, contudo, deixamos de ter certeza quanto ao valor de seu momento na direção y , pois na fenda os elétrons se difratam e, por essa razão,

observa-se na placa fotográfica, depois de certo tempo, um padrão de difração produzido pelos elétrons.

Podemos estimar o espalhamento no momento dos elétrons por $\Delta p_y \approx p \cdot \Delta\theta$, quando θ é um ângulo muito pequeno ($\tan \theta \approx \theta$). Da ótica se sabe que a distância entre o máximo (A) de um padrão de interferência e o primeiro mínimo (B) é dado por $\Delta\theta = \lambda/a$, de forma que $\Delta p_y \approx p_0 \lambda/a$. Dessa relação decorre que quanto menor for a abertura da fenda (a) e, portanto, melhor determinada a posição do elétron, mais desconhecida será o seu momento linear, pois Δp_y cresce, alargando a figura de difração, ou vice versa. Utilizando a relação de De Broglie, pode-se calcular o valor do comprimento de onda do elétron, $\lambda = \frac{h}{p}$, resulta $\Delta y \cdot \Delta p_y \approx h$

Esse resultado parece entrar em conflito com o nosso senso comum, ou seja, com aquilo com que lidamos no dia a dia, como é o caso da determinação simultânea da posição e do momento linear de um corpo, classicamente. No entanto, o Princípio de Incerteza de Heisenberg (ou Princípio da Indeterminação) nos estimula a pensar que essa não é uma experiência com a qual temos familiaridade, com que temos contato, que faz parte das nossas experiências cotidianas. A indeterminação surge do que podemos chamar de dispersão intrínseca das grandezas quânticas, ou seja, uma grandeza quântica não possui um valor definido antes da medida; o seu valor está como que espalhado. Segundo Heisenberg (1984), nada nos impede de medirmos mais e mais precisamente a posição de uma partícula. Ao fazermos isso, a natureza conspira para que a medida do momento se torne mais e mais imprecisa. O contrário também é verdade.

Para análise da indeterminação entre energia e tempo, Johansson e Milstead (2008); Greca e Herscovitz (2002) usam como exemplo um assunto bastante comum nos livros-textos de MQ, abordando a penetração de barreira. No nosso mundo clássico uma bola rolando por uma superfície é incapaz de superar uma barreira se sua energia cinética no pé da barreira é menor que a energia potencial gravitacional que ela teria no topo. Isto também pode ser visto como a bola não possuindo energia suficiente para passar através de um campo de força gravitacional. Uma situação análoga acontece no núcleo de um átomo, mas desta vez há um final diferente para o contexto. Aproximadamente 10^{22} vezes por segundo, uma partícula alfa, um estado ligado de dois prótons e dois nêutrons, quica para cá e para lá contra as paredes de um campo de força criado pela força nuclear forte que mantém o núcleo do átomo coeso. Uma energia típica de uma partícula alfa é

4 MeV, que é bem menor que a energia requerida para superar aquele campo de força e escapar. Portanto, o decaimento alfa não deveria ocorrer. Mas ocorre. Como isto acontece? O Princípio da Incerteza permite ocasionalmente a uma partícula alfa “tunelar” através da barreira de energia para dentro da região na qual somente a força de repulsão elétrica é relevante. Deixando de lado as complicadas interações da partícula alfa com o campo de força, é possível visualizar que o Princípio da Incerteza permite à partícula alfa “emprestar” energia suficiente ΔE por um curto intervalo de tempo Δt necessário ao escape. Quanto maior a energia necessária a ser emprestada, $\Delta E \approx \frac{h}{4\pi\Delta t}$, menor o tempo disponível para o empréstimo e menos provável será que ela escape.

Nos primeiros anos da Complementaridade e do Princípio da Indeterminação, muitos experimentos do pensamento foram elaborados na tentativa de violar esses princípios da MQ. Um dos Físicos que mais se opuseram à Interpretação de Copenhague foi Einstein. Pelo menos em três momentos diferentes (1927, 1930 e 1935) ele apresentou argumentos contrários a essa interpretação da MQ.

3.3 Objeções de Einstein aos Princípios da Complementaridade e da Incerteza.

É tentador supor que a condição de “exclusividade mútua” não seja o eixo central da Complementaridade e que o Princípio da Indeterminação possa estar errado, devendo ser possível saber simultânea e exatamente a posição e momento de uma partícula. Einstein, que nunca se sentiu confortável com o tipo de objetividade e previsibilidade presente na MQ, procurou, através de três críticas, refutar essas condições. Nesse subitem iremos explorar de forma mais acentuada o experimento EPR. Quanto aos outros dois ataques de Einstein, faremos breves relatos dos seus desenvolvimentos e conclusões.

A primeira tentativa ocorreu durante a V Congresso de Solvay, em Bruxelas. Na ocasião, durante o intervalo das conferências, Einstein que se encontrava insatisfeito com a interpretação de Bohr e Heisenberg, propôs um experimento-de-pensamento (*gedanken experiment*), chamado de experimento da dupla fenda, com o objetivo de violar os princípios da Incerteza e da Complementaridade, mostrando as suas inconsistências.

No experimento abaixo, a ideia de Einstein era tentar determinar o caminho pelo qual o fóton ou o objeto quântico rumo, após passar por uma das fendas, por meio de uma medição no momento linear transferido para o anteparo das fendas, supondo que o mesmo se movimentava. Dependendo de como o anteparo das fendas se movimentava, se deduzia por qual fenda a partícula havia passado, já que o anteparo se encontra livre para se movimentar.

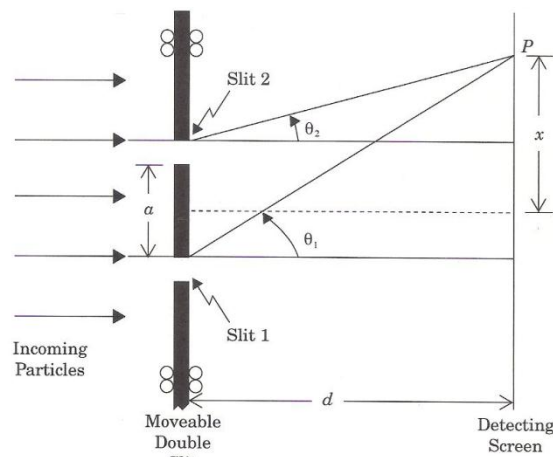


Figura 04 – Greenstein e Zajonc, 1997, p.87.

Considerando que o anteparo está sujeito a relação de incerteza, Bohr mostrou que a incerteza na posição das fendas “borraria” o padrão de interferência. A tentativa de medir o caminho dos fótons por meio de medidas do momento ou do impulso dado ao anteparo das fendas destrói o fenômeno ondulatório, resultando em um fenômeno corpuscular, de acordo com o Princípio da Complementaridade. Notemos que a ideia fundamental de Bohr que nos permitiu chegar a essa conclusão foi a de que um componente macroscópico, o anteparo móvel das fendas, também é limitado pela relação de Incerteza.

Durante o 6º Congresso de Solvay, em 1930, um novo desafio foi lançado por Einstein. Vejamos:

Suponhamos uma caixa perfeitamente isolada, como na figura 05, na qual uma quantidade de luz é interceptada. A presença da luz contribui para o peso da caixa, através da equação ($E = m.c^2$). Por exemplo, se tivermos um milhão de fótons visíveis do espectro aprisionados na caixa, a sua massa adicional seria cerca de $10^{-30} \text{ kg} \approx$ massa do elétron. Considere que a caixa esteja equipada com um diafragma ligado a um relógio. Num determinado tempo conhecido, o diafragma abre deixando escapar um único fóton. Assim, podemos medir o peso da caixa antes e depois do fóton escapar,

obtendo a medida exata da energia e consequentemente o intervalo de tempo de sua produção, contrariando a relação de Incerteza (Energia-tempo), que determina que essas grandezas sejam complementares.

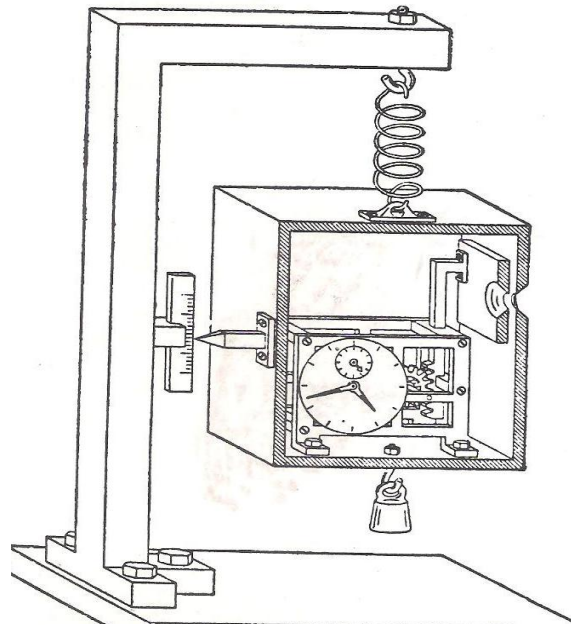


Figura 05 – Greenstein e Zajonc, 1997, p.90.

Novamente, Bohr conseguiu superar o desafio do argumento de Einstein, afirmando que o relógio usado para determinar o intervalo de tempo da emissão, era sensível a sua posição no campo gravitacional da terra, através do princípio da equivalência da relatividade geral. Assim, ao ajustar a massa suspensa no fundo da caixa, a posição do ponteiro, ou a extensão da mola, (z) pode ser ajustada. A força da gravidade agindo sobre a caixa é (mg), que é contrabalanceada pela força para cima da mola (kz). Para mensurar a massa (ou energia) do fóton que saiu da caixa, nós podemos aumentar a massa suspensa de modo a zerar o ponteiro. Esse processo implica uma medida da posição da caixa (para verificar que o ponteiro ainda aponta para zero). Logo, desde que a relação de incerteza do momentum e da posição de Heisenberg seja mantida, o melhor que podemos esperar para a incerteza do momentum é $\Delta P_z = \frac{h}{2\Delta z}$, onde Δz é a precisão com a qual nós temos que voltar a zerar o ponteiro. O *insight* crucial de Bohr foi o de que essa incerteza do momentum implica uma incerteza na medida da massa da caixa.

Segundo nos relata Kragh (1999), o resultado desse embate foi igual ao primeiro, ou seja, concepção de Bohr para a MQ foi reforçada e o ceticismo de Einstein parecia ser injustificado ou inválido. Um após outro, todos os argumentos que Einstein havia

proposto foram mostrados por Bohr para ignorar na sua cadeia de raciocínio certos fatores físicos. Até então, Einstein esperava refutar a MQ, mostrando que as relações de incerteza estavam erradas. A sua crença na causalidade final foi inabalável e na década de 1930, ele mudou o foco de suas objeções de inconsistência para incompletude.

Após sua “derrota” em 1930, segundo Kragh (1999), Einstein continuou pensando profundamente sobre a situação epistemológica da MQ e estava convencido de que uma exata descrição causal dos fenômenos naturais deve ser possível. Em 1935, Einstein publicou na revista *Physical Review*, junto com outros dois colegas do Institute of Advanced Studies, Princeton, Boris Podolsky e Nathan Rosen, um pequeno artigo que se tornou famoso, cujo título era: *Can Quantum Mechanical description of Physical Reality Be Considered Complete* (1935)? Esse artigo ficou conhecido no meio acadêmico como o paradoxo EPR, devido ao sobrenome dos seus autores. Nesse artigo, eles partem de três hipóteses:

- As previsões da MQ estão certas;
- Nada se propaga mais rapidamente do que a luz;
- Se, sem perturbar o sistema de forma alguma, pudemos prever com certeza (com probabilidade igual a um) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento de realidade física correspondendo a essa quantidade física.

Nesse artigo de quatro páginas, simples e devastador, o centro do argumento EPR é o conceito de localidade, ou seja, quando dois acontecimentos estão afastados entre si, eles não podem se influenciar instantaneamente, haja visto que a influência entre eles demoraria um tempo, ainda que pequeno, para atravessar o espaço que os separa, devendo viajar com uma velocidade finita e igual à velocidade da luz.

Resumidamente, o experimento (do pensamento) consiste de um sistema formado por duas partículas (atômicas ou subatômicas) que, interagem e se separam. Planejando a medida da posição da primeira partícula, por exemplo, a partir das equações da MQ poderemos prever a posição da segunda partícula e essa será bem definida. Poderemos agora fazer uma medida do momento da primeira partícula e da mesma forma anterior, poderemos prever o momento da segunda partícula. Portanto, é possível prever posição e momento bem definido da segunda partícula, sem que alguma medida fosse nela realizada, contrariando assim, o princípio da Incerteza. Dessa forma, a teoria quântica não nos oferece uma descrição completa da realidade, ou seja, haveria elementos reais,

na estrutura dos átomos, dos quais a teoria quântica não seria capaz de dar conta, sendo imprevisível e incerta. Segundo Freire Jr. (1999), a premissa adotada no EPR é de que dois objetos separados no contínuo espaço-tempo agem como dois objetos independentes, sem correlações a não ser aquelas admitidas pela Física clássica. Ou seja, o centro do argumento EPR é o conceito de localidade e o da MQ é não localidade.

A resposta de Bohr (1935) ao artigo EPR, com o mesmo título, dois meses depois, publicada na mesma revista, destaca que a separação no espaço e no tempo das duas partículas que haviam interagido, não as torna completamente independentes nas suas propriedades quânticas.

No domínio quântico, o procedimento mediante o qual analisamos sistemas clássicos em partes interagentes cai por terra, pois toda vez que duas entidades se combinam para formar um único sistema (mesmo que seja por um período curto de tempo), o processo graças ao qual o fazem não é divisível (BOHR, 1995, p.86).

Assim, fica claro que, de acordo com a interpretação de Bohr, no domínio quântico, um sistema composto ou emaranhado não admite fatoração. Ou seja, não é lícito, na MQ, adotar a mesma função de onda para realizar distintas previsões que incluam medidas sobre o sistema, como fez Einstein. Percebe-se que, em sua resposta ao EPR, Bohr não valorizou o conceito de colapso da função de onda.

Freire Jr. (1999) ressalta ainda que objetos quânticos que interagiram e se separaram não podem ser considerados independentes, uma vez que não podemos lhes atribuir propriedades definidas independentemente. Ou seja, uma vez separados, espacial e temporariamente, não significa dizer que são independentes, mas que esses objetos quânticos continuam correlacionados ou emaranhados, obedecendo ao critério da não localidade.

3.4 Outros problemas nos fundamentos quânticos.

Os problemas que apresentaremos aqui, de forma resumida, continuam dentro da mesma perspectiva que gerou, nos subitens anteriores, grandes polêmicas a respeito da forma conceitual com que a Interpretação de Copenhague descreve os fenômenos do mundo quântico. Responder a essas indagações ou paradoxos, advindos de experimentos pensados, serviu tanto para melhorar a compreensão do mundo microscópico, como para o seu próprio desenvolvimento tecnológico.

3.4.1 O problema da medição

Segundo Greenstein e Zajonc (1997, p.181), as medidas no mundo quântico desempenham um papel radicalmente diferente do que elas fazem no mundo clássico. Classicamente, medidas têm uma natureza essencialmente passiva, ou seja, a partir delas descobrem-se uma realidade pré-existente. Assim sendo, todo conhecimento sobre o sistema e seu estado é comunicado macroscopicamente através do aparelho que realiza a medição do estado do sistema. Mas, na MQ, esse papel é muito mais ativo, tornou-se um conceito primitivo que foi integrado aos fundamentos da teoria. A tentativa de descrever quanticamente um processo de medida para a MQ, deve-se ao matemático von Neumann que, em 1932, adicionou um postulado aos já existentes, que afirmava sua transição instantânea durante um processo de medição, chamado de Postulado da Projeção ou “colapso da função de onda”, como vimos no subitem (3.2-I). Pelo postulado, a equação de Schrödinger não teria validade durante os processos de medição. Teríamos então dois processos: na ausência de medição, o processo seria regido pela equação de Schrödinger, evoluindo de modo linear, determinístico e contínuo; no outro, durante a medição, o processo evoluiria regido pelo postulado da projeção, sendo não-linear, descontínuo e probabilístico. Esse postulado é o mais controverso, sendo de fato, uma regra prática que permite identificar o estado quântico de um sistema após algumas das potencialidades quânticas se tornarem um fato concreto através de uma observação. Logo, realizar uma medição causa uma mudança incontrollável na função de onda. Além disso, realizar uma única medição não nos diz nada sobre qual era o estado do sistema a priori à medição; diz-nos somente o estado imediatamente após a medição. Além disso, esse postulado, segundo Freire Jr. (1999), incluía uma prova de impossibilidade da existência de teorias com variáveis suplementares àquelas já usadas pela teoria quântica.

Como acontece o colapso? Qual o papel do observador nesse evento? Que tipo de interação realiza uma medida quântica? Onde se encontra a fronteira entre o mundo clássico e o quântico, entre o que é real e o que é potencialidade? Essas são perguntas que o postulado não consegue responder.

A “solução” mais adotada desde o início pela maioria dos físicos consiste simplesmente em ignorar o problema. Assume-se, nessa posição ortodoxa, que durante o processo de

medida a equação de Schrödinger não se aplica, e que a evolução do estado se dá aí aleatoriamente.

Na perspectiva desse postulado, veremos três exemplos que sintetizam o que discutimos acima, confirmando que um objeto quântico (um elétron, ou um fóton, por exemplo) só tem uma grandeza bem definida após ele ter interagido com o aparelho de medição e o resultado ter sido obtido. Vejamos:

A figura representa um anteparo com uma fenda e um filme fotográfico no outro anteparo. Considere um elétron se propagando como uma onda, conforme a figura abaixo. Note que ao passar pela fenda ele se espalha, difratando-se na forma de ondas esféricas (Q) e sendo detectado em (P). Mas notem que depois da detecção do elétron, a onda que estava espalhada desaparece instantaneamente, sofrendo o que chamamos de colapso da onda.

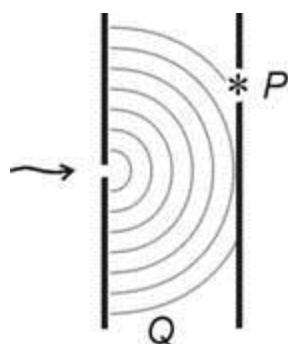


Figura 06. (Pessoa Jr., 2003, p.39).

P e Q podem estar separados a uma distância muito grande, como a distância entre a Terra e o Sol: como é que uma medição na Terra (P) poderia afetar instantaneamente uma onda no Sol (Q)? Isso seria um exemplo de “ação à distância”, ou “não localidade”, tema proposto no EPR e que só foi atenuado com o postulado de von Neumann. Perguntado como uma onda espalhada poderia ser observada como um ponto na tela, Niels Bohr não costumava falar em “colapso da onda”, mas afirmava que a perturbação não pode ser reduzida em magnitude abaixo do limite fundamental (quantum de ação).

Ainda dentro dessa perspectiva, usando o Interferômetro de Mach-Zehnder (Ricci et al., 2007) em simulação virtual (software educacional), pode-se explorar esse postulado, a partir de uma releitura mais moderna em termos tecnológicos, do experimento da dupla fenda de Young, levando-se em consideração os fenômenos de superposição e

interferência quânticas. Naturalmente, o interferômetro de Mach-Zehnder, tornou-se um dos experimentos cruciais para a compreensão dos fundamentos da MQ, provocando também, reflexões sobre o problema conceitual da escolha dos caminhos pelo fóton.

Outro exemplo que reforça nossa intuição sobre o princípio da superposição e o colapso do pacote de ondas refere-se ao experimento de Stern-Gerlach. Vejamos:

Considere um forno a altíssima temperatura, dentro do qual existem átomos de prata que são lançados através de um orifício, cuja dimensão é compatível com o seu livre caminho médio, passando a ter um feixe colimado de átomos. Esses átomos passam dentro de um par de ímãs, cujo campo magnético é não uniforme, sofrendo um desvio, conforme indicado na figura abaixo. Eles acabam imprimindo ou projetando duas manchas em uma tela, uma em “spin para cima” $\uparrow$ e outra “spin para baixo” $\downarrow$, chamado de estado do elétron. Seus autovalores podem ser expressos por $\pm \frac{\hbar}{2}$ mostrando que todos eles possuem um momento angular intrínseco, chamado de spin⁹.

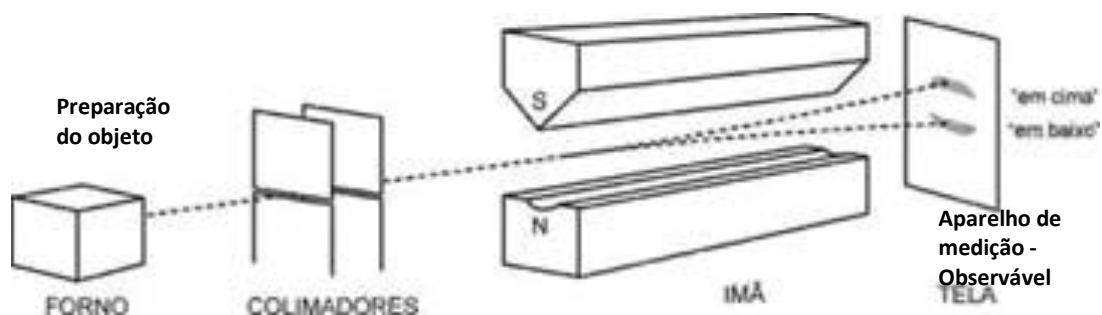


Figura 07. Pessoa Jr., 2003, p.40.

Vamos imaginar agora uma modificação no experimento, colocando detectores que não absorvam o átomo, mas os deixam passar. Imagine um único átomo de prata, num sistema fechado, sendo emitido pela fonte. Pergunta-se:

❑ Onde está o átomo antes da detecção?

⁹ Spin não tem imagem; não se pensa em um elétron girando ao redor do núcleo do átomo. É uma estrutura que se manifesta e seu comportamento aparece nesse experimento. É um fenômeno puramente quântico. A sua aplicação vai desde a Ressonância magnética nuclear ao experimento EPR, abrindo caminho para os aspectos filosóficos da MQ.

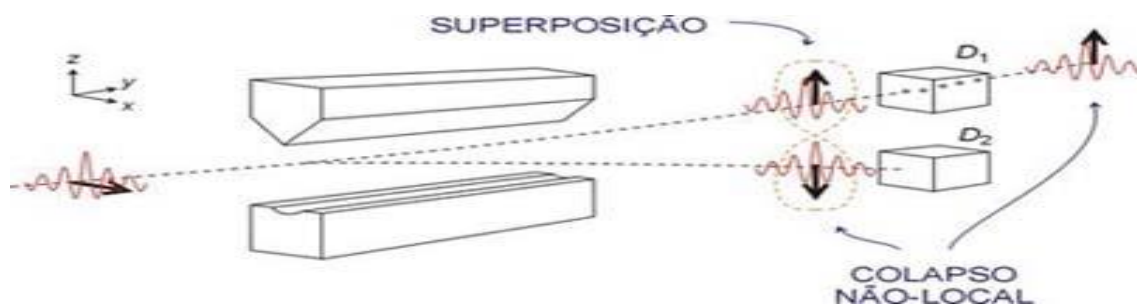


Figura 08. Pessoa Jr., 2003, p.41.

Não faz sentido essa pergunta, pois a MQ nos fala de um estado associado, ou seja, antes da medição há uma superposição de auto estados de posição, $\Psi = \beta(+\psi) + \alpha(-\psi)$, onde β e α são complexos que satisfazem a condição de normalização. A soma desses dois estados é também um estado admissível. Quando tentamos verificar onde o elétron se encontra, verifica-se o colapso da função de onda e no detector (observável – operador auto adjunto), temos $\Psi = \beta(+\psi)$, por exemplo. Se o colapso for algo real, onde e quando ele ocorre? Na detecção ou na observação feita por um ser consciente? Todas as concepções são plausíveis.

Como nos assegura Pessoa Jr. (2003, p. 50), a razão para afirmarmos que o átomo não está localizado nem no caminho que vai para D1, nem no caminho que vai para D2, mas que ele está de certa forma em ambos ao mesmo tempo, foi idealizada, por exemplo, por E. Wigner em 1963, retirando os detectores, recombinação dos dois feixes através de outros ímãs, e o que obteremos no final é exatamente o mesmo estado quântico que no início, com o spin apontado na mesma direção +x;

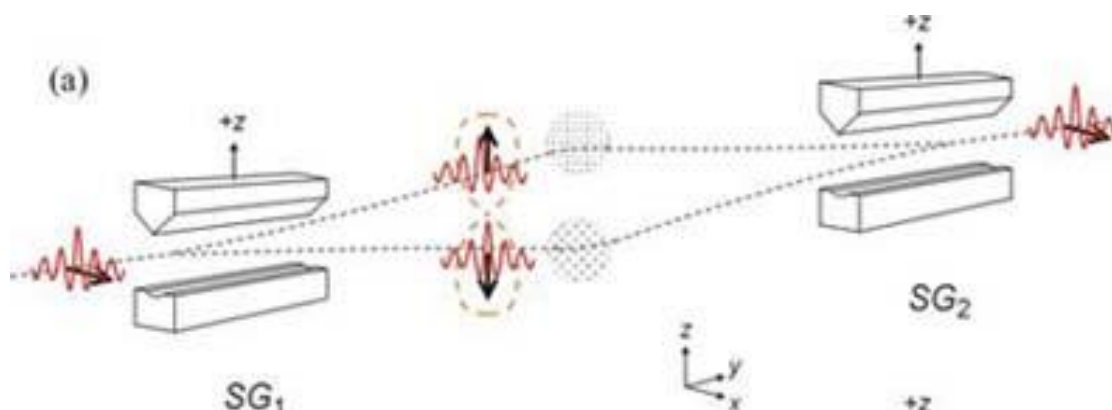


Figura 09. Pessoa Jr., 2003, p.49.

3.4.2 O paradoxo do Gato de Schrödinger

A partir do artigo publicado em 1935, Schrödinger (1935) descreveu um experimento mental, com o propósito de ilustrar e discutir alguns problemas conceituais da MQ, suas bizarrices e a matemática necessária para descrever os estados quânticos e suas superposições. Foi mais uma tentativa de criticar a interpretação de Copenhague, a sua incompleteza, a partir do que já havia sido discutido no EPR. Para ilustrar essa incompleteza, Schrödinger aplicou a teoria da MQ a uma entidade viva que podia ou não estar consciente. Ele descreveu como poderia, em princípio, transformar a superposição dentro de um átomo para uma superposição em grande escala de um gato morto e vivo, a partir de um "mecanismo diabólico". Schrödinger escreveu:

Qualquer um pode mesmo montar casos bem ridículos. Um gato é preso em uma câmara de aço, enquanto com o dispositivo seguinte (o qual deve estar seguro contra interferência direta do gato): em um contador Geiger tem uma pequena quantidade de substância radioativa, tão pequena, que talvez durante o período de uma hora, um dos átomos decaia, mas também, com a mesma probabilidade, talvez nenhum; se isso acontecer, o tubo do contador descarrega e através de um relé libera um martelo que quebra um pequeno frasco de ácido cianídrico. Se algum deles tiver saído do seu sistema natural por uma hora, alguém pode concluir que o gato permanece vivo enquanto o átomo não tiver decaído. A função (Ψ) do sistema poderia ser expressa por ter dentro dele o gato morto-vivo (com o perdão da palavra) misturado ou dividido em partes iguais (Greenstein; Zajonc, 1997, p.157 – tradução livre).

Se o átomo se encontra numa superposição de estado, assim, o gato deveria ser levado para uma superposição de estados, estando ao mesmo tempo vivo e morto! Somente quando um ser consciente abrisse a caixa e observasse o gato é que ocorreria um colapso de estado, ou para gato vivo ou gato morto. Schrödinger considerou que isso seria um absurdo, concluindo assim que não se pode estender a noção de superposições para corpos macroscópicos, como argumenta Pessoa Jr. (2003). Implícito nisso estava a mesma conclusão obtida por EPR: a MQ seria “incompleta”, ou seja, há algo faltando na teoria quântica.

Bohr também não aceitava a existência de superposição de auto-estados do mundo macroscópico e, portanto, não faz sentido para ele, perguntar sobre se o gato está vivo ou morto. O estado de superposição do gato representaria apenas nosso conhecimento

da situação, não uma realidade para além das observações. O ponto de vista de Bohr, considerando a MQ completa, somente enfrentou o argumento de Schrödinger com o desenvolvimento da noção de entrelaçamento ou emaranhamento (descoerência), isto é, com o estudo das condições em que os sistemas quânticos em interação com o meio ambiente, perdem a referida superposição de auto-estados. Porém, essa abordagem só veio a ser desenvolvida nos últimos quarenta anos, e depois da morte de Bohr, segundo Freire Jr. e Freitas (2006).

3.5 O teorema de Bell

O debate sobre a MQ ser ou não local foi reiterado, durante as décadas seguintes, pelos partidários de uma ou de outra posição que tentavam no terreno da epistemologia, fortalecer seus pontos de vista. Nesse sentido, trinta anos depois do EPR, na década de 60, esses pontos de vista foram abalados por J. Bell quando publicou dois notáveis trabalhos (1964 e 1966), que possibilitaram passar da discussão teórica e filosófica à prática experimental, trazendo um novo nível de discussão em torno dos conceitos de realidade e de medição. Freire Jr. (2006) nos lembra de que, em 1932, von Neumann havia demonstrado um teorema que afirmava a impossibilidade de existirem teorias físicas com mais variáveis que aquelas já usadas pela teoria quântica. Diante dessa premissa e das famosas objeções realizadas por Einstein e Schrödinger, em 1935, iniciava-se uma busca por novos modelos interpretativos da teoria quântica que ancorassem, de forma mais realista, os seus postulados, já que o formalismo matemático estava consolidado. A década de 1950 foi muito fértil para a publicação de artigos que apresentavam formulações alternativas à teoria quântica, com variáveis ainda não consideradas na teoria (variáveis escondidas) e capazes de resgatar uma descrição causal, no sentido clássico. Nesse contexto, destacam-se os trabalhos de D. Bohm e posteriormente os de De Broglie e Vigier. Esses trabalhos, em especial o de D. Bohm, que relatam sobre uma realidade física, com variáveis ocultas, na qual uma causa pode se propagar instantaneamente, regaram o terreno no qual germinaria já no início dos anos 60 importantes resultados, que são hoje conhecidos como “desigualdades de Bell”.

O primeiro trabalho de J. Bell, só publicado em 1966¹⁰, delineava sobre as diferentes provas de impossibilidades de teorias de variáveis ocultas na MQ. Segundo Freire Jr. (2006), esse trabalho possibilitou verificar que a visão do matemático von Neumann,

¹⁰ Segundo Pessoa Jr. (2006, p. 257), o trabalho foi enviado para *Review of Modern Physics* em meados 1964, sendo erroneamente arquivado e só publicado em 1966.

segundo a qual a MQ não era compatível com a possibilidade de variáveis adicionais, não se sustentava e que com algumas modificações dessas funções (variáveis escondidas) levavam à mesma conclusão afirmada por von Neumann. Mais precisamente, em setembro de 1964, segundo Pessoa Jr. (2006), estudando o paradoxo de EPR, Bell derivou o seu teorema, segundo o qual não se podem demonstrar correlações desse tipo (EPR) por um modelo onde parâmetros suplementares (Variáveis Escondidas local) determinem o estado individual das partículas. Mesmo que isso fosse possível, em diversas situações ocorreriam conflitos entre ambas as teorias.

Segundo Freire Jr. (2006, p.6), apesar de terem sido historicamente entrelaçados, as contribuições de Bell não deram um novo fôlego para o programa pensado por Bohm¹¹. Pelo contrário, Bell levou a questão das variáveis ocultas em uma direção completamente nova. Na verdade, a abordagem de Bell e suas principais realizações na mecânica quântica, são de uma estirpe muito diferente quando comparados com a interpretação Bohm (1952) das variáveis ocultas. Enquanto Bohm construiu modelos que primeiro imitam a mecânica quântica e posteriormente conduzem a resultados distintos, Bell estava interessado na análise crítica dos pressupostos por trás das demonstrações matemáticas inerentes aos experimentos do pensamento.

A contribuição mais relevante de Bell, segundo Freire Jr. (1999, p.137), se constituiu a partir do momento em que ele traduziu a premissa da separabilidade einsteiniana em um critério, físico e matemático bem definido, ao qual denominou de localidade. Em particular, com base nesse critério, formula um modelo de uma descrição mais completa, usando variáveis adicionais às usadas pela teoria quântica e busca tirar consequências desse modelo. Num cálculo que impressiona pela simplicidade, demonstra que um modelo desse tipo leva a desigualdades que, pela hipótese da localidade, não podem afetar umas as outras e devem ter seus valores variando de modo aleatório. Sua conclusão é então que, ao menos no caso considerado, *“a predição estatística da mecânica quântica é incompatível com a predeterminação separável”*.

Bell investigou as correlações que pudessem existir entre os resultados de medidas realizadas simultaneamente sobre duas partículas separadas. Essas medidas podiam ser de posições, momentos, spin, polarizações e outras variáveis dinâmicas das partículas.

¹¹ A teoria de Bohm pode ser chamada de “realista e não local”, pois ela fala de uma realidade na qual uma causa pode se propagar instantaneamente, a partir da ajuda de variáveis ocultas.

Muitos pesquisadores têm adotado a polarização como um meio conveniente de estudar as correlações EPR. Usaremos aqui a versão simplificada de D. Bohm, tomando como referência um par de partículas com spins correlacionados:

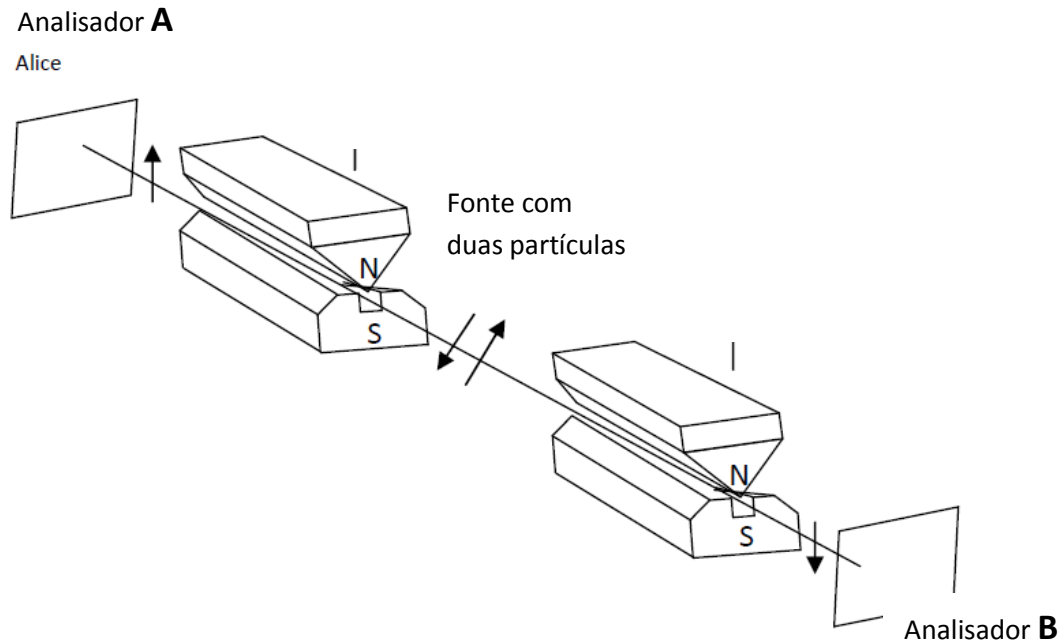


Figura 10: Greenstein e Zajonc, 1997, p.110.

Vamos supor que duas partículas com spins opostos sejam enviadas, a partir da fonte, em sentidos opostos, conforme a figura acima. O sentido do spin de cada partícula, pode ser denotado em qualquer direção possível, representado pelos vetores unitários η_1 , η_2 e η_3 , apresentando suas possíveis medidas de (+) ou (-), conforme a disposição dos vetores. Os ímãs não homogêneos poderão também situar-se, em qualquer direção dos vetores unitários.

Suponha que no analisador **A** uma medida seja realizada ao longo do eixo η_1 e em **B** no eixo η_2 . A probabilidade de encontrarmos (+) em ambos os aparelhos é dada por:

$$P(\eta_1 +; \eta_2 +)$$

Para uma teoria realista local, Bell estabeleceu a seguinte desigualdade:

$$P(\eta_1 +; \eta_2 +) \leq P(\eta_2 +; \eta_3 +) + P(\eta_1 +; \eta_3 +), \text{ assumindo a seguinte forma:}$$

$\text{sen}^2(\theta_{12}/2) \leq \text{sen}^2(\theta_{23}/2) + \text{sen}^2(\theta_{13}/2)$, onde θ_{12} , θ_{23} e θ_{13} , são ângulos entre os vetores unitários. Para uma nova medida arbitraria qualquer, temos:

$\theta_{23} = \theta_{13} = \frac{1}{2} \theta_{12}$ e usando a identidade trigonométrica,

$\text{Sen}^2 x = 4 \text{Sen}^2(x/2) \cdot \text{Cos}^2(x/2)$, temos:

$$\text{sen}^2(2\theta_{13}/2) \leq \text{sen}^2(\theta_{13}/2) + \text{sen}^2(\theta_{13}/2) \rightarrow \text{sen}^2(\theta_{13}) \leq 2 \text{sen}^2(\theta_{13}/2) \rightarrow$$

$4 \text{sen}^2(\theta_{13}/2) \cdot \text{Cos}^2(\theta_{13}/2) \leq 2 \text{sen}^2(\theta_{13}/2) \rightarrow \text{Cos}^2(\theta_{13}/2) \leq 1/2$, que é violado para valores dentro do intervalo $0 < \theta_{13}/2 < \pi/4$. Para o caso quântico, esse comportamento da “anti-correlação¹²” perfeita se verifica para qualquer orientação dos aparelhos de Stern-Gerlach. Portanto, na prática concluímos que a propriedade de anti-correlação perfeita para todos os ângulos, não pode ser obtida classicamente, isto é, por uma teoria realista local.

A desigualdade de Bell fornece um critério simples para testar qualquer teoria de variáveis escondidas local, permitindo levar o debate aos laboratórios, possibilitando o confronto experimental, entre as previsões da MQ e das teorias realista local. Segundo Bell (apud Freire Jr. 2006), essa não localidade está nas suas predições e não na sua estrutura estatística. Assim sendo, o teorema de Bell abre o caminho para um teste direto dos fundamentos da MQ, assim como para uma discriminação entre a ideia de Einstein de um mundo localmente real e a concepção de Bohr.

3.5.1 O experimento de Aspect

A possibilidade de levar para o laboratório físico a discussão sobre o problema tornou-se, segundo Freire Jr (1999), o mérito das desigualdades de Bell, deslocando o eixo das discussões do terreno puramente epistemológico para o experimental. Tratava-se, portanto, de um conflito entre propriedades: não-localidade quântica *versus* localidade.

A figura (11) abaixo mostra-nos a receptividade, em termos de citações, do teorema de Bell:

¹² Par de partículas quânticas no estado singleto (emaranhado), ou seja, os resultados são sempre opostos e o seu produto obedece a relação: (+) · (-) = (-).

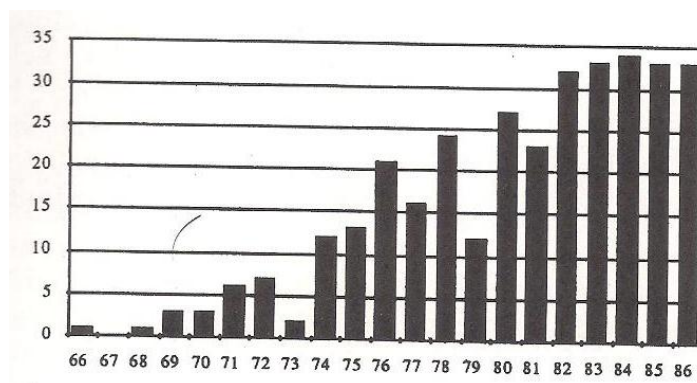


Figura 11: Greenstein e Zajonc, 1997, p.107.

Ao acompanhar a sequência anual das citações dos referidos artigos, percebe-se pouca atenção inicial dada as suas descobertas. Segundo Greenstein e Zajonc (1997), em circunstâncias normais uma descoberta importante é imediatamente seguida por um estouro de interesse, no qual são publicados muitos outros artigos, tomando-a como referência; depois há declínio gradual, sinalizando que aquele resultado esteve incorporado ao campo da pesquisa. Para o caso dos artigos de Bell, o gráfico nos mostra a quantidade de referências feitas ao longo dos anos, em especial nas décadas de setenta e oitenta, no qual nota-se um aumento significativo de reconhecimento da importância do teorema. Esse fato deve-se, necessariamente, a uma série de experimentos que foram realizados em todo o mundo, dos quais o mais sofisticado e preciso foi realizado pela equipe liderada por A. Aspect et al. (1982), em 1981, na França. "O teorema de Bell mudou a natureza do debate", disse Aspect (apud Freire Jr. e Greca, 2012).

A experiência crucial foi feita entre 1981 e 1982 e constava basicamente em medir determinadas características, como a polarização de fótons, que teriam interagido em algum momento no passado, como proposto por EPR. Em sua experiência, Aspect obteve como resultado o que previa a interpretação de Copenhague para a MQ, ou seja, o estado das partículas em questão só fica determinado no momento da medição; antes disso, é como se não existisse.

Na experiência, segundo Aspect e Grangier (2006), colocaram os polarizadores a uma distância de 12 metros um do outro, o que correspondia a um tempo de propagação da luz de 40 nanossegundos. Era necessário modificar aleatoriamente a orientação de cada polarizador; com isso, eles testariam a hipótese de que era a fonte que definiria a orientação da partícula, como se esperava na física clássica e previa o paradoxo EPR. O resultado de suas medidas estava de acordo com a previsão da interpretação de

Copenhague: o ato de medida definia as características das partículas. Assim, como nos assegura Freire Jr. (2006), os experimentos realizados levaram à conclusão inequívoca de que as previsões da MQ estavam confirmadas, violando as Desigualdades de Bell, em detrimento de teorias alternativas locais. Aspect e Grangier (2006, p.21) argumentam ainda que, esses primeiros resultados foram confirmados posteriormente, com novos pares de fótons emaranhados, explorando efeitos de óptica não linear em cristais anisotrópicos.

4. METODOLOGIA

"Os professores que se destacam transformam o ensino na aventura da educação. Outros podem adestrar-nos".

L. Stenhouse (1926 – 1982)

Neste capítulo, descrevemos a metodologia seguida em nosso estudo. Optamos pela abordagem qualitativa, em decorrência do enfoque dado ao objeto a ser estudado: conjunto de conteúdos de Mecânica Quântica (MQ) na formação de professores de Física, em cursos de Licenciatura em Física.

4.1 Pesquisa qualitativa

Visando alcançar os objetivos propostos neste estudo, privilegiamos a abordagem qualitativa, a qual, segundo Richardson et al. (2008, p. 80),

[...] facilita descrever a complexidade de problemas e hipóteses, bem como analisar a interação entre variáveis, compreender e classificar determinados processos sociais, oferecer contribuições no processo das mudanças, criação ou formação de opiniões de determinados grupos e interpretação das particularidades dos comportamentos ou atitudes dos indivíduos.

A pesquisa qualitativa se ocupa com um nível de realidade que não pode ou não deveria ser quantificado, ou seja, esse tipo de pesquisa, como ressalta Minayo (2008), trabalha com o universo dos significados, dos motivos, das aspirações, das crenças, dos valores, das atitudes, enfim, com todos esses fenômenos humanos que fazem parte de um contexto social, de uma realidade vivida e partilhada com outros semelhantes. Assim, entendemos que esse nível de realidade não é mensurável, precisa ser descrito e analisado pelo pesquisador.

A pesquisa qualitativa está sendo usada no meio acadêmico, como uma nova perspectiva de produção de conhecimento, por meio de uma interação entre o pesquisador e os atores sociais. Assim, esse tipo de abordagem facilita compreender em profundidade alguns fenômenos do processo ensino-aprendizagem, tornando-se, portanto, uma referência para investigar diferentes contextos. No nosso caso, o foco principal de estudo refere-se ao processo vivenciado por professores em formação, nos cursos de Licenciatura em Física da Universidade Federal da Bahia (UFBA) e

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), durante a fase em que eles cursaram as disciplinas relativas aos fundamentos da MQ, como Estrutura da Matéria I, Física Moderna e Mecânica Quântica.

Acreditamos que a relevância desta pesquisa reside no fato de que a literatura (EULER et al. 1999; OSTERMANN; RICCI, 2005; OSTERMANN; RICCI, 2004; OSTERMANN et al. 2009) nos mostra que a formação do licenciando em Física ainda na graduação possui falhas, apresentando lacunas no que se refere ao ensino dos fundamentos da MQ. No entanto, não há estudos como este que propomos que mostrem por que ela é inadequada.

No âmbito do paradigma qualitativo, podem ser realizadas pesquisas de tipos variados: etnográfica, estudo de caso, participativa e outros. Nesta tese, utilizamos o *estudo de caso*, cuja justificativa será descrita a seguir.

4.2 Estudo de caso

A característica básica de um estudo de caso é esclarecer, heurísticamente, situações reais vivenciadas por indivíduos em grupos, em um contexto real, em que múltiplas fontes de evidências são expostas, oferecendo informações várias sob “background” teórico que determina o estudo em questão. Segundo Patton (2002), “os estudos de caso são particularmente úteis quando se pretende compreender determinados indivíduos, determinado problema ou uma situação particular, em grande profundidade, sem favorecer a generalização” (p. 55)¹³.

Apoiado nessa descrição teórica, caracterizamos nossa pesquisa como um estudo de caso, tendo em vista que procuramos descrever os fatos vivenciados no contexto da sala de aula de dois cursos de Física, tais como abordagem clássica da Física, aprendizagem dos alunos, dificuldades de aprendizagem, valorização do tratamento matemático, dentre outros, visando esclarecer e compreender como se dá a formação, em relação aos aspectos conceituais da MQ para licenciandos em Física.

Notadamente, não podemos dizer que as descrições realizadas no acompanhamento das disciplinas citadas anteriormente, bem como os resultados aqui apresentados sejam universais, e que a partir deles podemos ter um processo conclusivo em relação aos

¹³ Tradução nossa.

propósitos do ensino e aprendizagem dos fundamentos da MQ. São muitas as variáveis envolvidas nesse processo e que não foram contempladas em nossa pesquisa. Essas limitações não nos permitem saber tudo sobre o caso, cabendo ao investigador decidir até onde deve ir, qual o nível de profundidade do conhecimento a que pretende chegar, de forma a ser-lhe possível atingir os objetivos a que se propõe.

Esse tipo de metodologia, usada em nossa pesquisa, utiliza diferentes técnicas de coleta de informação e/ou de dados, tais como: a observação, a entrevista, a análise documental e os questionários. Utilizamos a observação, a entrevista, a conversa informal¹⁴ e a análise documental, cuja descrição e modo de utilização serão apresentados no item a seguir.

4.3 Instrumentos da pesquisa e procedimentos para a coleta de dados

Entendemos que qualquer desses instrumentos utilizados para a coleta de dados oferece uma leitura interpretativa que não encerra em si uma verdade absoluta, nem a pretendemos, não estamos nesta busca. Entretanto, erros interpretativos podem ser minimizados pela variedade desses mesmos instrumentos. Assim, entendemos que foi o uso articulado desses instrumentos, mesmo sendo aplicados em etapas diferentes da pesquisa, que nos permitiu, durante o processo de análise dos dados, verificar que conceitos de MQ estavam sendo estudados, como eram realizadas essas aulas e como os alunos reagiam a essas explicações. A discussão desses dados foi antecedida de uma descrição, que orientou o processo interpretativo.

4.3.1 Observação não participante

Segundo Lüdke e André (1986, p. 26): “a observação ocupa um lugar privilegiado nas novas abordagens de pesquisa educacional e possibilita um contato pessoal e estreito do pesquisador com o fenômeno pesquisado”.

Neste estudo, adotamos o termo *observação não participante* concordando com Patton (2002, p. 264-269 – tradução livre) ao afirmar que “se o observador não interage de forma alguma com o objeto de estudo no momento em que realiza a observação, não

¹⁴ Apesar de, inicialmente, essa conversa não ter sido estabelecida como instrumento de coleta de nossos dados, ela passou a sê-lo, pois as informações dela decorrentes nos trouxeram outros tipos de questionamentos, que complementaram o que vínhamos analisando.

poderá ser considerado como participante”. Para ele a pesquisa observacional, participante ou não, permite ao investigador desenhar um conhecimento pessoal durante o estágio de reflexão e introspecção do local onde as pessoas se encontram, na tentativa de entendê-las. Dessa forma, entendemos que a observação constituiu elemento fundamental para a nossa pesquisa, por ela estar presente desde a formulação do problema, passando pela construção de hipóteses, coleta, até análise e interpretação dos dados. Foi utilizada também para confirmar ou refutar as informações obtidas através das entrevistas que, na verdade, revelam apenas como as pessoas percebem o que acontece e não o que realmente acontece.

É impossível observar tudo ao mesmo tempo. No entanto, tendo definido claramente os nossos objetivos, foi possível validar nossas observações adequadamente, dentro do contexto da sala de aula, permitindo-nos usar as vantagens dessa técnica, além de ficarmos atentos aos diversos fatores desfavoráveis que interferem na sua ocorrência, procurando minimizá-los.

Apesar de não ser uma pesquisa etnográfica, que vai muito além da descrição de situações, ambientes, pessoas ou da mera reprodução das suas falas e de seus depoimentos (Fazenda, 1995), entendemos que o ambiente de trabalho teve também o seu papel de destaque nas observações realizadas, influenciando física, social e psicologicamente no desenvolvimento das atividades ali realizadas, contribuindo de forma significativa na coleta de informações. Assim, o nosso primeiro desafio foi descrever o cenário das aulas bem próximo da realidade, em especial no acompanhamento das diversas intervenções, diálogos e debates espontâneos, entre professor e alunos. Ao passo em que se tem que observar, criteriosamente, a aula e suas nuances, também há necessidade de serem feitas anotações, tendo em vista que a memória não é confiável.

Em agosto de 2009, demos início às observações em sala de aula, que duraram até dezembro de 2009. As primeiras observações realizadas aconteceram no Instituto de Física, na UFBA, no curso de Licenciatura em Física e na disciplina de Estrutura da Matéria I, por ocasião de nossa permanência ali para cursar duas disciplinas obrigatórias do Programa de Pós-Graduação daquela Instituição, oferecida aos doutorandos do DINTER – UFBA/UEPB (Doutorado interinstitucional). Posteriormente, em fevereiro de 2010, iniciamos as observações não participantes nas salas de aula da UEPB,

acompanhando primeiramente seis alunos na disciplina de Física Moderna até junho de 2010. Esses alunos, a partir de julho, passaram a cursar, paralelamente à disciplina de Física Moderna, outra disciplina de quatro créditos, Mecânica Quântica, lecionada por outro professor, cujas ementas se encontram em anexo. Após um mês de aulas dessa disciplina, alguns alunos desistiram, inclusive um dos quais estávamos observando. Portanto, a nossa amostra foi reduzida para cinco alunos.

Comparecíamos duas vezes por semana às aulas das disciplinas citadas, ao longo de um ano e meio, ficando em classe por períodos em torno de uma hora e quarenta minutos, ou seja, o equivalente a duas aulas. Foram ao todo 25 aulas de observações, em cada disciplina, além de 8 horas, aproximadamente, de entrevistas gravadas e transcritas, que ocorreram sempre ao final de cada semestre, antes da entrega dos resultados da segunda avaliação. Fizemos isso em comum acordo com os professores, pois temíamos que os alunos, ao passarem por média, não voltassem mais à sala de aula e dessa forma perdêssemos a oportunidade de entrevistá-los. Assim também ocorreu na UEPB, onde as entrevistas com os alunos escolhidos ocorreram após o término da disciplina de Mecânica Quântica, uma vez que essas disciplinas aconteceram de forma paralela, como já dissemos.

Embora o número total de licenciandos não ultrapassasse 25 alunos nas duas Universidades e nos períodos considerados, havia alguns deles que frequentavam as aulas, esporadicamente, não apresentando um comportamento de alunos efetivamente matriculados nas disciplinas mencionadas, não comparecendo, inclusive, nos dias de atividades de avaliação. Assim, direcionamos nossa atenção mais diretamente a seis alunos de cada Instituição, levando em consideração dois aspectos: alunos que participavam das aulas, fazendo perguntas, tirando dúvidas, procurando interagir de alguma forma e alunos que pouco participavam ou demonstravam pouco interesse pelos assuntos discutidos. Trata-se de uma amostra intencional, que se revela mais adequada para a obtenção de dados de natureza qualitativa. Nas palavras de Gil (2009, p.145), adaptadas para nosso estudo:

Como a pesquisa tem como objetivo a mobilização do grupo envolvido, será interessante selecionar trabalhadores conhecidos como elementos ativos em relação aos movimentos sindicais e políticos, bem como trabalhadores sem qualquer participação em movimentos dessa natureza. As informações que esses dois grupos podem transmitir serão muito mais ricas que as que seriam obtidas com base em critérios rígidos de seleção de amostra.

A opção por formar a amostra com alunos de duas Universidades diferentes deveu-se, primeiramente, pela possibilidade objetiva de realizar esta interação entre a UFBA e UEPB, através do DINTER (Doutorado interinstitucional) dentro do Programa de Pós-Graduação oferecido pela Universidade mantenedora: a UFBA. A segunda, porque essa possibilidade abriu caminho para uma caracterização entre dois cursos de Licenciatura em Física e, com isso, ampliarmos a qualidade da nossa amostra, entre a formação de professores em Estados diferentes e sem comparação entre os seus resultados.

O próximo subitem descreve outra ferramenta de pesquisa que usamos como procedimento de coleta de dados, no sentido de corroborar as observações realizadas.

4.3.2 Entrevistas e conversa informal com professores e alunos

A entrevista se diferencia dos outros instrumentos de coleta de dados aqui descritos, no sentido de estabelecer uma relação direta entre o pesquisador e o entrevistado, permitindo resgatar alguns aspectos que não ficaram claros durante as observações não participantes, por exemplo. Como descreve Patton (2002, p.306), as observações fornecem uma verificação sobre o que é relatado em entrevista; por outro lado, as entrevistas permitem ao observador ir além do comportamento externo, ao explorar sentimentos e pensamentos dos observados.

O tipo de entrevista que optamos para a nossa pesquisa, com professores e alunos, é chamado de estruturada. Ela possui um roteiro previamente definido (anexos 8 e 9), com perguntas pré-formuladas, de acordo com os objetivos, inicialmente estabelecidos, da pesquisa. Apesar disso, tivemos o cuidado de deixar o entrevistado falar, não o interromper, falar com ele só o necessário, sendo maleável no sentido de dirimir as dúvidas que às vezes surgiam em relação às perguntas, descontraí-los em relação à presença do gravador (instrumento que sempre inibe quem não o utiliza costumeiramente). Acreditamos que dessa forma evitamos respostas distorcidas, em função de alterar o estado emocional do entrevistado.

Todas as entrevistas foram gravadas, com a licença dos entrevistados, e suas transcrições foram feitas posteriormente. As entrevistas foram destinadas a investigar mais profundamente a opinião dos estudantes em relação ao que eles vivenciaram nas disciplinas específicas aos fundamentos da MQ em ambas as Universidades.

Conduzimos também entrevistas com os professores, no sentido de obter dados e percepções relevantes ao processo de formação do licenciando em Física, em relação aos fundamentos da MQ presentes em suas disciplinas.

Ao final das entrevistas, tanto com os alunos quanto com os professores, conversávamos a respeito do que eles vivenciaram ao longo das disciplinas, possibilitando-nos outros tipos de informação que não conseguimos durante a nossa entrevista estruturada. As conversas informais na UFBA não foram gravadas, mas as da UEPB o foram, com a permissão de alguns alunos e de um professor.

A seguir, destacamos outra fonte de dados, os documentos, que usamos em nossa pesquisa de campo, com a intenção de retirar deles informações necessárias e relevantes, no sentido de descrever o perfil do licenciando, do curso de Licenciatura em Física de cada Instituição pesquisada e das disciplinas ali acompanhadas, com ênfase nos fundamentos da MQ.

4.3.3 Documentos

A análise documental pode se constituir numa técnica valiosa de abordagem de dados qualitativos, seja complementando as informações obtidas por outras técnicas, seja elucidando novos aspectos de um tema ou problema. Na definição de Marconi e Lakatos (2010, p. 48), "a característica da pesquisa documental é que a fonte de coleta de dados está restritos a documentos, escritos ou não, constituindo o que se denomina de fontes primárias." As fontes documentais abarcam uma gama significativa de informações; podem estar materializadas em arquivos históricos, em documentos oficiais, nos diários, em biografias, jornais, revistas, materiais didáticos, enfim, nos mais diversos registros estatísticos que possibilitem um levantamento favorável ao que se pretende pesquisar. Assim sendo, a coleta de dados a partir de registros documentais é considerada por Gil (1999) como a mais simples das técnicas, se comparada aos procedimentos diretos, como a observação e a entrevista, além de não incomodar os participantes.

Analizamos dois tipos de documentos: os didáticos (livros texto, provas, listas de exercícios) e os oficiais (Projeto Político Pedagógico - PPP, Diretrizes Curriculares da Licenciatura em Física, provas do ENADE - Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes - para a Licenciatura em Física - 2005 e 2008, ementas). A sua maioria

apresenta parâmetros estatísticos importantes, dando-nos uma visão mais acurada dos cursos que pesquisamos, no sentido de corroborar fortemente as evidências das outras fontes (observação, entrevista e conversa), acrescentando-lhes informações. No entanto, nem sempre os documentos retratam a realidade. Por isso, assim como fizemos nas observações, no qual tínhamos os objetivos às claras, durante a análise dos documentos, levamos em consideração apenas as informações que se relacionavam com o objeto e objetivo da pesquisa, como por exemplo, as habilidades e competências sugeridas pelas Diretrizes Curriculares e ENADE, para a formação de um licenciando em Física, em relação aos aspectos conceituais da MQ.

Inicialmente, consultamos a legislação que regulamenta os cursos de Licenciatura em Física (Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – lei nº 9.394/96) e os documentos institucionais das Universidades em estudo (UFBA e UEPB) – Projeto Político Pedagógico (PPP). Esses documentos norteiam as ações das Universidades em todas as suas instâncias, sendo fruto da interação entre os objetivos e prioridades estabelecidas pela coletividade, que estabelece, por meio da reflexão, as ações necessárias à construção de uma nova realidade. Nesse contexto se insere o ENADE, que deve ser o elo entre o que consta nas Diretrizes Curriculares e o que a Universidade espera da formação de um licenciando em Física.

O ENADE, como parte do SINAES (Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior), tem por objetivo aferir o desempenho dos estudantes em relação aos conteúdos programáticos previstos nas diretrizes curriculares do respectivo curso de graduação, às suas habilidades para ajustamento às exigências decorrentes da evolução do conhecimento e às suas competências para compreender temas exteriores ao âmbito específico de sua profissão, ligado à realidade brasileira e mundial e a outras áreas do conhecimento. (BRASIL, 2004).

Assim, o estudo desses documentos sob a perspectiva da temática de pesquisa – a Mecânica Quântica no processo de formação de licenciandos em Física, informou-nos de forma qualitativa a situação dessa formação, bem como a perspectiva das questões do ENADE, relativas aos anos em que os cursos de Física foram analisados, 2005 e 2008, sobre essa temática. Em relação ao curso de Licenciatura em Física da UFBA, constatamos que não possui seu PPP, apesar de ser um curso novo, pois sua criação ocorreu em 1999.

Outros documentos oficiais que pesquisamos foram: o programa das disciplinas – Estrutura da Matéria (UFBA), Física Moderna e Mecânica Quântica (UEPB) – e o

fluxograma das Licenciaturas das respectivas Instituições. Esses documentos (em anexos) foram solicitados e recolhidos nas secretarias dos cursos. Ambas as Universidades oferecem modalidades diurnas e noturnas, com currículos diferenciados.

Além desses documentos, incluímos também para a análise, o que estamos chamando aqui de material didático: o livro texto utilizado pelo professor da disciplina, provas, listas de exercícios e uso de materiais alternativos como recurso de aula.

No próximo capítulo apresentamos a análise dos dados coletados a partir das ferramentas aqui apresentadas. Durante a análise, faremos breves comentários a respeito de cada situação vivenciada em sala de aula e durante as entrevistas, sem uma linearidade, de modo a nos permitir passear por essas analogias, contemplando-as e analisando-as à luz dos nossos objetivos. Ao procedermos dessa forma, terminamos por contemplar algumas outras categorias (aprendizagem do aluno, recursos didáticos, procedimentos metodológicos e outros), que de certa forma estão subjacentes ao foco principal desta tese. Ao final da análise, faremos uma discussão mais ampla, indo além do que já se sabe na literatura a respeito da formação do licenciando em Física em relação ao ensino de MQ. Para finalizar este capítulo, indicamos que a referência aos participantes de nossa pesquisa será feita da seguinte forma:

P1S – o professor de Salvador (UFBA);

P1 e P2 – professor 1 e 2 de Campina Grande (UEPB);

A1, A2, A3... – alunos 1, 2, 3 de Campina Grande (UEPB);

A1S, A2S, A3S... – alunos 1, 2, 3 de Salvador (UFBA).

5. RELATO DAS OBSERVAÇÕES/ENTREVISTAS/DOCUMENTOS DIDÁTICOS

Those who are not shocked when they first come across quantum theory cannot possibly have understood it¹⁵.

Niels Bohr (1885 – 1962)

O presente capítulo se propõe, inicialmente, a fazer um relato e análise dos dados colhidos nas observações, nas entrevistas e nas diversas avaliações (provas e exercícios) realizadas em salas de aula, durante o acompanhamento das disciplinas Estrutura da Matéria I na UFBA, Física Moderna e Mecânica Quântica na UEPB, dos cursos de Licenciatura em Física das respectivas Universidades. Essas descrições e análises, realizadas separadamente, são acompanhadas de uma discussão, com o objetivo de se ter uma visão mais acurada a respeito da formação desses licenciandos em relação aos fundamentos da Mecânica Quântica (MQ). Essa discussão deverá nos conduzir ao porquê de essa formação ser ou não adequada aos futuros professores de Física.

5.1 O CASO DA UFBA

Estrutura da Matéria I é a única disciplina obrigatória oferecida aos concluintes e licenciandos em Física, no curso noturno, na UFBA, que trata, em parte, da introdução à MQ. Em paralelo, os alunos cursam uma disciplina obrigatória, em laboratório, cujo objetivo é a demonstração de experimentos que versam sobre fenômenos clássicos e híbridos (Espectro de absorção, Espectroscopia Óptica, Efeito Fotoelétrico, Medidas de Campos Magnéticos, Efeito Hall, experimento de Franck-Hertz, Interferômetro de Michelson, Efeito Faraday e Carga Específica do Elétron), totalizando 120 horas-aulas.

A nossa análise foi focada na parte teórica da sala de aula e não houve de nossa parte um acompanhamento aos alunos às aulas experimentais, que ocorreram durante o período da tarde no laboratório, lecionada por outro professor do departamento de Física. Durante as aulas da disciplina Estrutura da Matéria I, houve pouca interação entre a parte teórica e experimental.

¹⁵ Aqueles que não ficam chocados quando se deparam pela primeira vez com a teoria quântica, provavelmente não a entenderam.

O objetivo dessa disciplina, conforme explicitado pelo professor PS1, é descrever a matéria com um forte apelo à chamada “velha Mecânica Quântica” (Estudo da radiação do corpo negro, os trabalhos de Planck e Einstein, modelos atômicos clássicos de Thomson, Rutherford e semi-clássico de Bohr, os trabalhos de Compton e De Broglie), como ele mesmo sinalizou durante sua entrevista:

“O eixo central desta disciplina é estudar o modelo desenvolvido para a matéria, no século XIX, ao modo microscópico, envolvendo diversas teorias: a clássica, eletromagnetismo, um pouco de teoria da relatividade restrita e MQ; então ela tá envolvida com diversas teorias da física. Mas, o eixo central é... o que me parece... a estrutura... é uma disciplina... até quanto você pode descrever a matéria no modelo clássico. O problema da crise toda na teoria clássica, tá certo? em descrever a matéria e a radiação, então isso é o que é importante. Muita gente acha que é MQ, mas eu acho que não é MQ. Tem que começar pela teoria cinética dos gases, desenvolver tudo isso até as equações de Schroedinger e algumas aplicações”.

Ao expor os objetivos da disciplina, o professor contempla em parte a sua ementa, uma vez que em sala de aula, no dia 30/09/2009, P1S reconhece e sugere que os alunos deveriam fazer uma disciplina de introdução à MQ, pois o objetivo desta disciplina (EM I) não chega a um estudo mais profundo da Quântica e nem conceitual. Ele sugere, ainda, que os alunos reivindiquem a criação dessa nova disciplina para o curso noturno. Esse não esclarecimento sobre o objetivo da disciplina repercute na compreensão dos alunos, quando na mesma aula ocorreu a seguinte discussão:

- A noite não rola professor, pois não tem nenhum professor que queira ensinar à noite, afirma (A2S);
- E o que eu estou fazendo aqui? (PS1);
- O Sr. é uma exceção (A2S);
- Não. Garanto a vocês que se fizerem uma representação junto ao departamento, essa disciplina será criada, essa história de adicional noturno não existe (PS1).

Durante o curso da disciplina, os assuntos que foram contemplados seguiram o roteiro do livro de Caruso e Oguri (2006), começando pelo Atomismo na Física, o movimento browniano, a natureza clássica da luz, eletrólise de Faraday, os raios catódicos, a radiação do corpo negro e os modelos atômicos clássicos. O professor sempre enfatizou que esses conteúdos são fundamentais para o desenvolvimento inicial da Física Moderna, e realizam bem o seu papel em difundir a Estrutura da Matéria. Para o que ele chamou de MQ, o professor destinou em torno de três semanas e uma aula extra, conforme nossas anotações, de todo o conteúdo destinado, conforme a ementa, a “conhecer a equação de Schroedinger e fazer algumas aplicações”. Nas nossas anotações de sala de aula, os assuntos referentes à MQ, foram os seguintes:

- Efeito fotoelétrico e efeito Compton – 16/11/2009;
- Átomo de Bohr – 18 e 23/11/2009;
- Experimento da dupla fenda com elétrons; onda de matéria de De Broglie – 23 e 25/11/2009;
- A interpretação probabilística de Max Born – 30/11/2009;
- Princípio da Incerteza – 02/12/2009;
- Equação de Schrödinger e aplicações - 07/12/2009 (aula extra).

Em se tratando dos assuntos semi-clássicos, a partir dos novos fenômenos que levaram à criação de um novo enfoque para Física Quântica, como o efeito fotoelétrico e o efeito Compton, houve por parte do professor uma significativa preocupação em mostrar aos alunos os aspectos dessa ruptura. Notadamente, essa preocupação tem sido alertada por pesquisadores (OSTERMANN; RICCI, 2004, por exemplo), apontando que a maioria dos professores, alunos de um curso de mestrado profissionalizante, apresenta em suas concepções uma falta de clareza sobre os limites de validade entre a Física Clássica e a MQ.

Esse alerta o professor demonstrou em termos dos cálculos teóricos, com toda a matemática necessária, descrição das técnicas, leitura de parte de um dos artigos de Einstein: “Sobre o ponto de vista heurístico”, retirado do livro “o ano miraculoso de Einstein” e das discussões realizadas na sala, quando ele se referia aos resultados experimentais colhidos nas aulas de laboratório, em que ele fazia questão de ressaltar, mostrando aos alunos a necessidade do entendimento dessa discrepância para futuras interpretações da MQ. É possível identificar essa preocupação em seu discurso na aula do dia 16/11/2009, quando, se referindo à experiência do efeito fotoelétrico, ele afirma:

- Nunca diga: uma hora ela é partícula, na outra ela é onda; isso tá errado!!!
- A luz, Srs., é o que é; eu não sei o que ela é. A manifestação da onda e da matéria sempre será como quanta;

Nesse momento, o professor lê para a turma um pequeno trecho do livro de Caruso e Oguri (2006, p.333), que diz:

No contexto teórico da experimentação do efeito fotoelétrico, sabe-se, entretanto, que em 1905, Einstein considerou o fóton apenas como um quantum energético de luz e não como uma partícula real com momentum.

A associação com o momentum, só vem aparecer em seu artigo de 1909 e confirmado, tempo depois, nos trabalhos de Compton.

Após a leitura, o professor sugere aos alunos que reflitam sobre o que foi lido, chamando a atenção para a importância dada ao fóton de luz e a possível cobrança do assunto na prova. Nessa aula, o professor desenha no quadro o esboço do que representa o experimento e o gráfico do efeito fotoelétrico e explica cada etapa do fenômeno em questão. Anotamos os seguintes diálogos:

- As pessoas devem entender o que é o quantum de luz; a hipótese é de que a luz é composta por pacotes de energia hf ou fóton de luz, capaz de arrancar elétrons da placa (PS1); Quando tiverem oportunidade, voltem ao laboratório para observar essa coisa da função trabalho do material que compõe uma célula fotoelétrica (PS1);
- Há alguma relação entre o quantum de luz e uma quantidade mínima de eletricidade? (A4S);
- Não; essas quantidades são diferentes e não se relacionam (PS1);
- Professor, como uma onda arranca um elétron? (A5S);
- Chacoalhando o elétron com bastante energia. No efeito fotoelétrico, senhores, um fóton é completamente absorvido por um elétron. (PS1).

O professor desenvolve a equação referente ao fenômeno discutido, seguindo o livro citado na página anterior, e ao final ele afirma que o experimento realizado por Milikan, em 1914, confirma o que Einstein escreveu. Nessa aula, os alunos demonstram uma grande ansiedade em relação à prova, pois o resultado da anterior, que envolveu assuntos relativos à teoria cinética dos gases, não tinha sido positivo.

Nas conversas, antes do início da aula, eles se questionam e não entendem por que o professor não resolve as questões do livro de exercícios. O livro de exercícios indicado pelo professor refere-se a: Exercícios resolvidos – Caruso e Oguri (2009).

- Talvez isso tenha influenciado nos resultados, comenta (A2S).
- Nem precisa ele resolver, os exercícios já estão resolvidos, comenta (A3S), referindo-se ao livro de exercícios adotado pelo professor. O que eu queria era que ele tirasse as dúvidas, acrescenta (A3S);

Na entrevista, A3S repete o que disse acima esclarecendo:

Olha eu resolvi muitos problemas, estavam fáceis e repetitivos no livro de exercícios. Fiz resumos para tentar entender cada assunto, mas não fizemos exercícios conceituais, como você deve ter notado. Eram só as questões prontas do livro de exercícios (Caruso e Oguri, 2009). Tiramos Xerox do livro e era só repetir o que estava ali.

Essa afirmação ressalta, fortemente, a questão da resolução de problemas parecidos e repetidos, em detrimento dos problemas conceituais e históricos inerentes a esse assunto.

Na segunda avaliação realizada com a turma, o professor solicitou dos alunos que respondessem à seguinte questão sobre o efeito fotoelétrico:

Questão 2- (2 pontos) Sobre o “efeito fotoelétrico” responda as questões a seguir.

- a) Qual a hipótese de Einstein para explicá-lo? Escreva a equação básica do modelo de Einstein e o significado de cada termo.
- b) Sabendo que num dado metal o comprimento de onda correspondente ao limiar do efeito fotoelétrico é $3.400\text{\AA}$, determine: (i) a função trabalho (em eV), (ii) a energia cinética máxima dos fotoelétrons ejetados por uma luz de comprimento de onda $2.000\text{\AA}$.

Dos nossos alunos observados, no total de seis, apenas três responderam à proposição (a) da questão, descrevendo corretamente a equação e descrevendo o seu aspecto teórico, conforme relatamos abaixo:

- “O efeito fotoelétrico é o surgimento de uma d.d.p no metal quando submetido à luz. Einstein concluiu que esta propriedade deveria ter uma dependência com a frequência da luz que incidia no metal e não com a intensidade. Ele observou que como a energia de uma onda eletromagnética depende da frequência e a partir do modelo do átomo de Bohr, ele sugeriu que a luz deve transportar energia em quantidades bem definidas, que mais tarde foi denominada de quantum de energia” (A2S).
- “É o efeito de emissão de elétrons quando a radiação de determinado comprimento de onda, incide sobre a superfície de um metal. Ejeção de elétrons decorrente da incidência de luz. Segundo a teoria clássica, o esperado era que se aumentando a intensidade da luz incidente, aumentaria a quantidade de elétrons ejetados, o que não ocorre. Einstein utilizou os trabalhos de Planck e partiu do princípio que a energia se propaga de forma discreta (pacotes) e não de forma contínua. Postulou então que a energia necessária para arrancar o elétron da superfície do metal, só seria possível se a energia aplicada fosse a partir de determinado valor, relacionada com a constante de Planck ou múltiplo inteiro de h e a frequência da radiação. Assim ficava explicado que determinadas frequências, independentes da intensidade, não provocavam o efeito fotoelétrico” (A4S).
- “Para Einstein este fóton seria a energia liberada pelo elétron na transição de um estado para outro. O que resultou na equação acima...” (A5S).

Segundo a avaliação do professor, os alunos A4S, A2S e A5S deram respostas convincentes para essa proposição. Notadamente, os seus comentários em sala de aula fluíram sempre em função de uma frequência mínima para que haja a emissão de elétrons da placa, com uma preocupação em explicar o porquê disso e a sua ruptura com a ondulatória clássica. Para a maioria dos alunos, esse tipo de questão já é bastante trabalhado no ensino médio e nos vestibulares, o que terminou por levá-los a compreender corretamente o papel da função trabalho do metal nas situações apresentadas. Resultados semelhantes a esses, têm sido encontrado em diversas pesquisas, a exemplo de Ostermann, F et al. (2009). Por outro lado, não houve por parte do professor uma preocupação em apresentar a evolução histórica do efeito fotoelétrico e nem o uso atual desse experimento.

A aula seguinte foi dedicada a explicar e desenvolver no quadro todo o aparato matemático necessário para o modelo atômico de Bohr. Houve alguns comentários entre professor e alunos a respeito da teoria envolvida, que dizem respeito à inclusão desse assunto no Ensino Médio:

- Esse é um dos poucos assuntos que trabalho em sala de aula... Faço isso na quarta unidade do primeiro ano (A2S);
- Eu também (A4S)... Só que no final do terceiro ano e para quem quer... (risos)... Poucos vão.

O professor corrige algumas distorções conceituais, notadamente no que se refere ao modelo pensado por Bohr, diferentemente do imaginado por Rutherford, causando certo desconforto em alguns dos alunos observados. Esse desconforto, pensado em termos do “modelo planetário” para o átomo de Bohr parece estar profundamente ancorado no sistema cognitivo da maioria dos alunos, fato esse adquirido nas aulas de Física e Química no ensino médio, como garantem Kalkanis et al. (2002).

Observamos que alguns comentários ditos pelo professor, durante essa aula, ou não foram compreendidos ou não estavam de acordo com o que alguns alunos estavam esperando ouvir. O professor foi coerente em suas explicações, diferentemente de alguns alunos, que continuaram expressando seus pensamentos em função do modelo de Rutherford, gerando algumas confusões a esse respeito. Verificamos essas falsas concepções numa das questões da prova, quando eles foram solicitados a responder à seguinte questão:

Questão 3 – (2 pontos) Sobre o modelo de Bohr do átomo de hidrogênio, responda:

- Descreva o modelo e seus postulados.
- Quais são a energia, momento e comprimento de onda de um fóton emitido pelo átomo de hidrogênio ao fazer uma transição direta de estado excitado com $n=4$ para o estado fundamental?

O quadro a seguir mostra as respostas dadas pelos alunos observados a questão 3(a), vejamos:

ALUNOS	RESPOSTAS
A1S	a) Assemelha-se ao modelo planetário pensado por Rutherford; a diferença é que os elétrons como “bolinhas” passam a ter órbitas definidas.
A2S	a) O modelo do átomo de Bohr foi uma junção do modelo atômico

	de Rutherford com as ideias de Planck. Rutherford sugeriu que o átomo tinha uma estrutura semelhante ao sistema solar, em decorrência de suas experiências com o bombardeamento de folhas de ouro com partículas alfas. Esse modelo apresentou problemas, no sentido de que ao se movimentar em torno do núcleo, emitindo radiações, o elétron iria colidir com o núcleo, colapsando o átomo. Para Bohr, não deveria haver emissão de radiação, enquanto orbita em torno do núcleo. O elétron só transmite ou absorve energia ao passar de uma órbita para outra e a energia de transição corresponde à diferença de energia associada às órbitas de origem e destino, ou seja, as energias de transição são bem definidas.
A3S	a) O modelo atômico de Bohr descreve um núcleo central com os elétrons em órbitas circulares concêntricas, onde os elementos do núcleo são positivos eletricamente.
A4S	a) O modelo de Rutherford de núcleo central e elétrons planetários satisfaziam de certo modo, porém apresentava uma série de problemas, pois como se sabe, cargas aceleradas emitem radiação, ora os elétrons em órbitas geram cargas aceleradas. Portanto, deveriam emitir radiação e consequentemente perder energia e cair no núcleo. Para resolver esta questão, Bohr postulou que os elétrons não ocupariam qualquer posição na eletrosfera, e sim apenas órbitas estacionárias, resolvendo assim o problema da estabilidade do átomo.
A5S	a) Estado estacionário de um átomo, provocaria o mesmo colapso, como poderia acontecer a partir das ideias de Rutherford. Momento quantizado e definido, frequência bem definida entre dois estados de energia. - átomos em estados estacionários; - condições de quantização; - frequência definidas.

A6S	Não respondeu
-----	---------------

Quadro 1 – Respostas à questão 3 (a)

Como podemos perceber, apesar das boas respostas dadas, a maioria dos respondentes continua associando o modelo de Bohr ao de Rutherford, imaginando elétrons que giram em torno do núcleo, mantendo suas órbitas definidas, absorvendo ou liberando energia na mudança de órbita e com uma estrutura semelhante ao sistema solar. Essa forte conotação, presente na estrutura conceitual do aluno, promoveu uma satisfatória discussão, durante a aula, gerando um ganho conceitual significativo em alguns alunos, levando-os a reverem os seus conceitos. Para esse fato, Fischler e Lichtfeldt (1992) e Souza e Justi (2003) alertam para o cuidado no estudo do modelo atômico de Bohr, no sentido de valorizar excessivamente o modelamento de sistemas quânticos a partir de concepções clássicas. Acrescentam ainda que a maioria dos livros didáticos é a grande responsável por disseminar essas falsas concepções ou falsas analogias a respeito do modelo atômico de Bohr. Por outro lado, esperávamos que o professor tivesse aproveitado o momento para enfatizar a diferença conceitual entre o elétron em uma órbita quantizada no modelo semiclássico de Bohr e o elétron em um orbital atômico, no qual o atributo “posição” não está bem definido, mas isso não aconteceu.

As aulas seguintes desenvolveram-se em função do efeito Compton: o professor demonstrou no quadro as equações da conservação da energia e do momento para uma colisão entre um fóton e um elétron em repouso, a partir da incidência de um feixe de raios x. Ao final da explicação matemática do espalhamento, da relação de Compton, ele disse:

- Pronto pessoal, aqui está a diferença de comprimentos de ondas das radiações espalhadas, chamado de espalhamento Compton. Este experimento foi a evidência experimental que faltava para que a comunidade científica aceitasse o fóton como partícula e em algumas situações como onda.

Em outro momento, o professor acrescenta:

- Essa dualidade onda-partícula é um dos pilares da Física Quântica; acredite quem quiser, mas eu vejo como o início de entendimento de algo abstrato, que não precisa de muita conversa filosófica para entender.

Apesar dessa afirmação em sala de aula, na entrevista, perguntado sobre quais conceitos são mais importantes, o professor não direciona a sua fala para a dualidade, afirmando que:

“Olha, no sentido da disciplina Estrutura da Matéria I, eu diria no sentido vitorioso da física, seria até chegar o modelo atômico molecular, principalmente. Do ponto de vista experimental, conceitual foi o desenvolvimento da física do século XIX, do modelo de átomos e moléculas, como a matéria se organiza e depois, a teoria que descreve essas partículas, tá certo? A descoberta que o átomo, a existência do átomo, até situações mais complicadas... O mais importante seria a teoria atômica molecular é uma coisa vencedora... E o mecanicismo que traduz essa teoria, a MQ. Então, a gente já tem domínio da física, no sentido do comportamento dessa partícula que compõem a natureza de átomos e moléculas”.

Ao final da aula o professor comenta para os alunos sua formação em Física pura, de ter trabalhado com todas as ferramentas pesadas da matemática usadas na MQ e nunca ter tido a oportunidade de uma reflexão sobre essas coisas conceituais e filosóficas da MQ, apenas calculando-as. Ele diz entender as dificuldades que uma disciplina de MQ representa, afirmando que na sua graduação os livros usados eram considerados “barra pesada”, citando Schwabl (1995) e Shankar (1994). Em seguida o professor mostra os livros de Caruso e Oguri (2006) e Eisberg e Resnick (1997), afirmando que eram “os mais fraquinhos” de todos, mas que ele prefere usar para as suas aulas na Licenciatura.

Ao confessar sobre a dureza dos livros citados em sua formação, o professor nos reporta a uma pesquisa conduzida por David Kaiser (Freire Jr.; Greca, 2010, p.361), informando que em mais de 50 livros publicados entre as décadas de 1950 e 1980 nos Estados Unidos, da graduação à pós-graduação, havia semelhanças entre as longas listas com problemas de complicados cálculos e poucas reflexões conceituais. Possivelmente, a “dureza” citada pelo professor, esteja relacionada a uma herança adquirida pelos cursos de Física no Brasil, que assim como na Europa ou nos Estados Unidos do pós-guerra, continuaram fortemente enfatizando o formalismo matemático da MQ nos livros e em salas de aulas, em detrimento aos seus aspectos filosóficos conceituais.

Em outra pergunta, na entrevista, perguntado sobre o que ele acha que de fato os alunos aprendem nesta disciplina, o professor respondeu:

“Olha essa coisa de aprender ou não, às vezes me dá uma angústia danada, é difícil e eu fico com dúvidas, ainda mais quando se trata da MQ. É... Eu prefiro que as pessoas registrem por que o elétron não é igual a uma bolinha, que tipo de experimento conduziu a uma teoria nova, então nesse sentido me parece... Eu vou lembrar o experimento da dupla fenda. Imagino qualquer um desses alunos já ensinando, e eu ficaria satisfeito se chegasse pra eles e dissesse: fala-me aí sobre aquele experimento da dupla fenda com elétrons, bolinhas e ondas clássicas. Fala sobre isso em dez minutos. Então... Eu acho que se ele falasse bem isso aí, eu ficaria satisfeito; e parece que eles aprenderam”.

Portanto, ele reafirmou a necessidade de entendimento da dualidade. Em sala de aula, ele volta a discursar em prol da dualidade, vejamos:

- Eu acho que uma abordagem branda sobre MQ, do tipo da dualidade, é o ideal para vocês; essa é a abordagem que vou tentar administrar neste curso, pois essa é a primeira vez que leciono esta disciplina e, portanto, deverá ter um aspecto diferente, mais flexível. Eu não sei, mas talvez seja este o caminho para se inserir Física Moderna no ensino médio (P1S);
- Mas professor, o senhor acha que essas coisas podem interessar aos estudantes das escolas públicas ou até mesmo as escolas particulares? (A4S)
- Eles não entendem as leis de Newton, vão entender essa briga entre a onda e a partícula... Risos... (A5S)
- Bem, eu não sei... Vocês é que serão professores ou se já ensinam, é quem sabe. (PS1)

O aluno A4S, quando perguntado sobre quais assuntos ele abordaria no ensino médio, respondeu:

“No ensino médio, em média, você ministra duas horas-aulas por semana. Pronto. É o mínimo do mínimo. Segundo, existe uma carga horária mínima, muito reduzida para ensinar física; existe uma desvalorização do professor que é resultado ou reflexo da não valorização da ciência. Temos hoje um ensino médio voltado para preparar para um emprego ou para uma universidade que seria também uma forma de preparar para um emprego, de modo que não vejo assim essa curiosidade por essas questões científicas; os alunos de escolas públicas estão interessados em outras coisas e não querem saber da dualidade e nem também os professores que lá ensinam. Logo, acho que o assunto já trabalhado por lá é o suficiente”.

Como observamos nas entrevistas, a preocupação da maioria dos observados refere-se à reduzida carga horária semanal para a disciplina de Física, muitas aulas para ministrar, às vezes em dois ou mais colégios, o que termina por não ter tempo de preparar aulas com perspectivas dentro do contexto da Física do século XX. No entanto, essa maioria ousaria lecionar tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, apesar de não ter tido uma boa formação nesse aspecto. Resultados semelhantes foram encontrados por Cruz e Junior (2009); Rocha (2010), apontando que a maioria dos licenciandos que participaram de suas pesquisas mostrou-se propensa e interessada em discutir, no Ensino Médio, temas e tópicos de Física Moderna e Contemporânea, ainda que alguns deles sintam-se despreparados para tal tarefa.

As aulas realizadas nos dias 23 e 25/11/2009 foram dedicadas ao experimento da dupla fenda e às ondas de matéria de De Broglie. O professor desenha no quadro uma figura que lembra esse experimento. Inicialmente ele idealiza uma fonte de luz monocromática, incidindo sobre as fendas, explicando a existência dos fenômenos de

difração e interferência, assuntos, segundo ele, já estudados na óptica ondulatória e até mesmo em laboratório.

- Portanto, não deve haver dúvidas a respeito. Estou certo, rapazes? (P1S)

Os alunos parecem não concordar com o professor, que continua com o experimento, explicando os fenômenos comentados. A seguir, o professor propõe que a fonte de luz deve enviar apenas um fóton por vez:

- E agora pessoal, devemos esperar o mesmo padrão de interferência aqui no anteparo? (P1S);
- Como seria enviar um fóton por vez? (A4S);
- Imagine se isso fosse possível... E aí o que vocês acham? (P1S);
- Acho que sim... Sei lá... Talvez se demorar um pouco, né? (A2S);
- É; vamos dizer que dure certo tempo. Acreditem, mas a experiência tem nos mostrado que haverá o mesmo padrão de faixas claras e escuras, como antes. O que isso nos prova, hein? Claro que nos mostra a possibilidade de um fenômeno, que é tido como ondulatório, mas que pode ser pensado também para essas partículas virtuais. As mesmas partículas pensadas por Einstein, no experimento do efeito fotoelétrico, entenderam? (P1S)
- É no mínimo estranho, mas tudo bem. (A3S)

Na entrevista, realizada após o término do curso, quando perguntamos ao aluno (A3S), qual foi a sua dificuldade em termos de conceitos e resolução de problemas, ele continua mantendo sua opinião sobre a dualidade e foi enfático ao afirmar:

“Aquela questão sobre a luz. Ela se comportou para esse fenômeno como onda; não, não existe ela se comportar como onda, ela é as duas coisas o tempo inteiro. Então, quando você fala isso... não é correto. Não existe ela se comportou como onda... ela está sendo naquele momento como...então é complexo a mecânica quântica”.

Enquanto isso, o aluno A4S revela, na entrevista, que as suas dificuldades foram com relação aos conceitos e à ferramenta matemática. Vejamos:

“Olha, os conceitos são assustadores... Né? Sem enfeitar muito o discurso, os conceitos são assustadores. Só não é mais assustador, porque a nível microscópico a gente não vivencia essas coisas por aí, tomando susto em cada esquina. Mas os conhecimentos são abstratos, e muito... Ah... Surpreendentes. No entanto, a dificuldade principal eu acho que é o tratamento matemático. Nosso professor não enfatizou muito na resolução de problemas, pois o tratamento matemático não é trivial e é bem sofisticado”.

Na aula seguinte, o professor redesenha o experimento da dupla fenda no quadro e diz que agora as coisas vão ficar mais interessantes:

- Agora pessoal, vou tirar aquela fonte de luz, emitindo um fóton por vez, e vou usar uma metralhadora que irá “cuspir” balas sobre essas duas fendas. (P1S);
- E agora Srs. o que devemos esperar aqui neste anteparo? Um padrão de interferência, uma difração igual o que ocorreu com a luz, com o fóton individual? (P1S).

O professor usa o livro de Moisés Nussenzveig (2002), volume quatro, para mostrar uma figura relativa a essa experiência. Em seguida, ele retorna ao questionamento, mas já respondendo o que havia perguntado:

- Por que ao usar o experimento da dupla fenda com balas, não se observa o padrão de interferência que foi observado com a luz? Já sabemos que a luz é constituída de fótons ou partículas virtuais; e aí? Que zorra é essa?

Antes que os alunos começassem a responder, o professor desenha no anteparo, pontos na frente de cada fenda, representando a incidências das balas naquele local, afirmando que não haverá padrão interferência por causa do tamanho das balas em relação à largura das fendas:

- Todos os corpos senhores, apresentam além de propriedades corpusculares, apresentam também propriedades ondulatórias. (P1S);
- Todos os corpos professor? Independente do tamanho dele? (A4S);
- Por que não vemos isso acontecendo no dia a dia? (A5S)
- Por quê? Te devolvo a pergunta. Pense mais um pouco, já falamos sobre isso, rapaz. (P1S).

Nesse momento, o professor vira-se para o quadro, reinando certo desconforto na turma, o que foi amenizado com a intervenção do A2S, comentando para o A5S, que se não vemos tal fenômeno acontecer no dia a dia, deve-se ao fato do comprimento de onda dos objetos serem menores que as possíveis fendas ou obstáculos da sala, por exemplo.

- Pelo menos foi isso que eu entendi; tá certo professor? (A2S);
- Certíssimo, rapaz. Você acredita nisso? (P1S).

Os alunos nada respondem e parecem confusos. O professor continua suas explicações, alertando-os que dessa vez usará uma fonte aquecida de onde serão emitidos elétrons, ao invés de balas. No anteparo, o professor desenha regiões com bastantes pontinhos e outras sem, afirmando que ali atrás, entre as fendas, os elétrons irão atingir com maior intensidade, com maior probabilidade, pondo-se a falar também da função de onda para os elétrons que ali chegam e do quadrado dessa função de onda, que deverá assegurar essa probabilidade. Vejamos:

- No nosso bom senso, essas bolinhas (elétrons) sendo emitidas por uma fonte térmica apresentam um comportamento estranho, concentrando-se aqui, atrás das fendas (P1S);
- Será que a fenda 1 não interfere com a fenda 2? (A2S);
- Como assim? Não rapaz, a fenda é apenas o lugar da passagem dos elétrons. O problema não é com a fenda rapaz e sim com o próprio elétron (P1S);
- Com o próton é a mesma coisa? (A3S);
- Sim para a interferência; no entanto, a figura será diferente por conta do comprimento de onda associado ao próton (P1S);

- Então, os elétrons às vezes agem como ondas e, às vezes como partículas, a luz, por sua vez, age como partículas e às vezes age como ondas. Tudo o que precisamos é de um experimento que revele o seu aspecto (P1S);
- Professor, o Sr. já viu na net um programinha chamado de Dr. Quantum sobre essa experiência? Tem também um experimento virtual usado pela professora Fernanda da UFRGS, dando conta do experimento da dupla fenda com diversas partículas, onde se pode observar nitidamente isso que o Sr. tá dizendo, inclusive usando outras partículas (A2S);
- Já, os resultados ali são muito bons (P1S);
- Tudo isso pessoal, é muito estranho! Isso é a dualidade. Os elétrons e demais partículas subatômicas não são nem partículas clássicas e nem ondas clássicas. E como conciliar essa coisa? Isso só foi resolvido com a interpretação probabilística de Max Born (P1S);
- Que grandezas da física explicam a natureza ondulatória para o elétron? Podemos associar uma função de onda para ele, assim como fizemos para a luz? (P1S);

Nessa mesma aula, o professor, propondo uma forma de verificação da interpretação proposta por Born, afirma que, na região de franjas mais claras, o módulo do quadrado da função de onda será maior ou vice versa. Ele alerta:

- Cuidado! Essa função de onda não é medida, não é real. Ela é abstrata e carrega a dinâmica do elétron. (P1S);

Ao término dessa explicação, o que terminou por ser antecipado teoricamente, o professor retoma o experimento e sugere que dessa vez a fonte lançaria apenas um elétron por vez, e que após algum tempo teríamos o mesmo padrão de interferência. Conclui citando que o fenômeno é dual. Resultados semelhantes foram obtidos por Olsen (2002) e Bilal e Erol (2007), quando afirmam que, para a maioria dos estudantes, os fótons apresentam uma natureza dual, enquanto os elétrons são partículas. Nesse sentido, apresentam dificuldades para entender a dualidade para os elétrons.

Continuando a aula, as seguintes discussões foram realizadas:

- Para Bohr, um fenômeno é ou corpuscular ou ondulatório, mas nunca os dois ao mesmo tempo. Ou seja, se houver padrão de interferência, não haverá inferência sobre a trajetória do elétron ou vice versa (P1S);
- Se você resolver olhar por onde esse elétron está passando, você irá interferir no sistema e deverá destruir o padrão ondulatório e o elétron será considerado uma partícula; sem olhar o padrão ondulatório será mantido. Na verdade pessoal isso passa a ser chamado, a partir de hoje, de colapso da função de onda. Seria uma forma de você gerar um obstáculo à onda, um bloqueio que se produz e aí você destrói o padrão de onda, tornando-a corpúsculo. (P1S).
- Então professor, esse fenômeno é dual? E se eu olhar estraga o experimento? É isso? (A3S);
- É... se você medir, altera o estado do sistema, ou seja, as franjas de interferências viram bolinhas. Srs. o universo conspira para que isso aconteça (P1S);
- Professor, o elétron se divide nas fendas? Ele sabe que está sendo observado? (A2S);
- Não sabemos o que acontece; a natureza não nos permite verificar. Para Bohr, não faz sentido perguntar por onde o elétron passou (P1S);

- Isso tá mais para bruxaria, professor (risos) (A3S);

O colapso no ato da medida foi discutido acima, sem que houvesse por parte do professor um esclarecimento sobre o postulado da projeção. Os alunos “aceitaram” passivamente as consequências da medição, face aos questionamentos apresentados acima, demonstrando interesse pelo assunto.

As aulas seguintes foram dedicadas ao tipo de função destinada a descrever o comportamento ondulatório da matéria, através da equação de Schrödinger dependente do tempo, com a intenção de calcular a energia e o estado de um sistema quântico. Durante essas aulas, o professor relata que o princípio da superposição quântica é o mais importante do mundo quântico e totalmente diferente do clássico. Nesse sentido, o aluno A2S perguntou sobre a definição do estado de um sistema quântico, obtendo a seguinte resposta do professor:

- Você sabe definir o estado de um objeto clássico? Então, é a mesma coisa... É... Quando você determina a posição de um objeto dentro da sala, através de sua velocidade, momento, energia, tempo, etc.

Posteriormente, por ocasião da explanação e dedução heurística sobre princípio da incerteza, através de um gráfico de um pacote de onda, o professor volta a ser indagado sobre a definição de estado quântico, dando a seguinte definição:

- É o estado quântico que representa uma partícula localizada em uma região do espaço e representada pela função de onda $\Psi(x,t)$. (P1S);
- Há como precisar, neste gráfico, a posição da partícula? (A3S);
- Quando fizermos isso, haverá um colapso e toda essa configuração (se referindo ao gráfico desenhado no quadro) ficará confinado a um ponto. (P1S);
- O elétron passou por onde? (A3S);
- Não podemos falar mais nisso; você tem que pensar em estado quântico representado por uma função de onda quântica. (P1S).

Durante as entrevistas, perguntamos aos alunos o que eles entendiam por estado quântico. Obtivemos as seguintes respostas:

Alunos	O QUE VOCÊ ENTENDE POR ESTADO QUÂNTICO
A1S	“É um estado bem definido, com níveis bem definidos”.
A2S	“Ainda não sei... Tenho que estudar mais”.
A3S	“Não... Sem chance. Foi um curso mais técnico, sem conceitos, sem teorias e não tivemos incentivo para isso”.

A4S	“Eu não tenho segurança pra falar; não... Não sei exatamente o que é estado quântico. Mas me parece que tem haver com o estado de energia das partículas quânticas, eu acho”.
A5S	“Refere-se a uma função de onda, que na verdade não existe. Seria um pacote de onda onde você tem a probabilidade de ter um elétron ali. Então, estado quântico é uma região onde temos uma probabilidade de encontrar o elétron, sendo que o estado carrega o elétron”.
A6S	“É algo similar ao estado termodinâmico, a partir do qual descrevemos suas propriedades, considerando essa comparação grosseira, ou seja, podemos descrever as propriedades quânticas de um sistema através do seu estado, como posição e momento, por exemplo. Talvez seja isso, assim nessa analogia”.

Quadro 2 – respostas dos alunos na entrevista

Percebemos que, na discussão sobre o experimento da dupla fenda com partículas quânticas, houve oportunidades pouco aproveitadas, para uma elaboração mais sofisticada de alguns conceitos importantes inclusos a esses assuntos, a exemplo de superposição linear e estado quântico. Notadamente, analisando as respostas acima, o conceito de estado e observável quântico não ficou bem definido, gerando insegurança e falta de informação adequada para seu conhecimento. Entendemos que os conceitos de estado e superposição linear de estados são correlacionados, fundamentais e imprescindíveis para o desenvolvimento conceitual da MQ. Didaticamente, parecem ser de fácil compreensão, mas, de fato, como nos asseguram Greca e Herscovitz (2002), foram conceitos que mais apresentaram dificuldade de assimilação por parte dos estudantes e, por isso, precisam de um redobrado cuidado ao explaná-los.

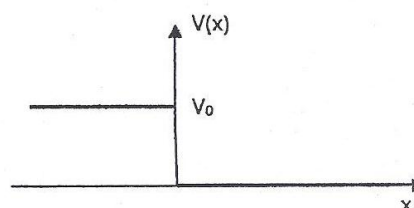
Continuando a aula, o professor expõe no quadro o desenvolvimento matemático da equação de Schrödinger, enfatizando que a função de onda Ψ é de natureza complexa, possuindo uma parte real e outra imaginária, significando que a mesma não possui significado físico direto e, portanto, não pode representar uma grandeza fisicamente mensurável por possuir uma parte imaginária. Faz uma revisão sobre números complexos, na intenção de chegar ao produto de uma função qualquer pelo seu conjugado, cujo resultado representa uma função real. Esse produto, segundo o professor, é mostrado dentro da MQ como a chamada densidade de probabilidade ou condição de normalização da função de onda. Em seguida, o professor mostra que a solução, $\varphi(x,t) = A e^{i(kx - \omega t)}$ satisfaz a equação de Schrödinger para partículas quânticas livres. Em nenhum momento houve, por parte do professor, uma integração entre o formalismo matemático e os seus fundamentos conceituais. Toda a turma copia, enquanto o professor desenvolve no quadro algumas aplicações de autovalores do

observável energia, para alguns potenciais particulares (poço infinito, degrau de potencial e barreira de potencial). Os alunos parecem compreender ou acompanhar o desenvolvimento matemático, no entanto, postos a resolverem e explicarem na prova a questão abaixo, relativa a esses assuntos, não responderam a letra “c” e apresentaram as seguintes respostas para as proposições “a” e “b”. Vejamos:

Questão 4 – (3 pontos) A equação de Schrödinger em uma dimensão espacial é dada por:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x,t)$$

- Escreva sobre a “Interpretação probabilística”.
- Escreva sobre o “Princípio de incerteza”.
- Obtenha a solução da equação de Schrödinger para os estados estacionários submetida ao potencial dado pelo gráfico ao lado, para o caso em que a energia total da partícula $E < V_0$



ALUNOS	RESPOSTAS
A2S	a) A interpretação probabilística da equação de estado de uma onda, $\Psi(x,t)$, sugere que Ψ é a função de densidade de probabilidade, cuja a soma de todas as probabilidades deve ser igual a 1 e é representada por $\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x,t) ^2 dx = 1$, e representando a possibilidade de encontramos uma partícula em uma certa posição x do espaço. b) O princípio da incerteza quer dizer que não podemos determinar com a mesma precisão a posição e o momento de uma partícula. Este princípio é melhor ilustrado no experimento da dupla fenda com elétrons, onde é inserido uma lâmpada entre a barreira com as fendas e o anteparo para poder determinar por qual das fendas o elétron passou. Antes da inserção da lâmpada podemos determinar com boa precisão os momentos dos elétrons que atingem o anteparo, mas a posição é dada por distribuição de probabilidade. Ao inserirmos a lâmpada a posição do elétron passa a ser bem definida, mas o momento passa a ser desconhecido, a figura de interferência no anteparo desaparece.
A4S	a) A interpretação probabilística é um fundamento da MQ que prevê que os fenômenos são tratados segundo os princípios estatísticos, diferente da mecânica clássica, cujos fundamentos se apoiaram em princípios

	determinísticos. Diferente da mecânica clássica, a MQ adotou a interpretação de probabilidade. b) O princípio da incerteza de Heisenberg, prevê que se conseguirmos determinarmos a velocidade de uma partícula, não poderemos determinar a sua posição.
A5S	a) A interpretação probabilística descreve através de uma função de onda as possibilidades de determinar as características de uma partícula sobre determinadas condições aplicadas em determinadas situações. b) O princípio da incerteza discute sobre a probabilidade de determinar-se a posição do elétron, onde a determinação de sua posição não é possível, mesmo que se determine o seu momento, onde a situação é considerada como estacionária e sua posição é definida probabilisticamente, ou seja, é apontada a provável região onde o mesmo se encontra.

Quadro 3 – Respostas as questões 4 (a) e 4 (b)

O professor considerou como totalmente corretas as respostas do aluno A2S, em relação às proposições (a) e (b). O aluno A4S acertou metade na (a), acertando a (b). Já o aluno A5S acertou um quarto na (a) e na (b). Os outros alunos observados não responderam às proposições. As respostas dadas à primeira proposição nos remete à aula dada sobre esse assunto, na qual os alunos respondentes identificaram a interpretação probabilística de Max Born, apenas como uma função estatística com o objetivo de quantificar um fenômeno quântico, em oposição ao seu lado teórico que caracteriza as grandezas quânticas não comutáveis. Em Paty (1995), encontramos:

[...] a função de probabilidade não pode ser ligada à realidade a não ser que (...) uma nova medida seja feita (...); “A transição do ‘possível’ ao ‘real’ ocorre durante o ato de observar”; É preciso lembrar que o que observamos não é a Natureza em si, mas a Natureza exposta ao nosso método de investigação. (HEISENBERG *apud* PATY, 1995, p.144).

Nas respostas apresentadas na proposição (b), quando solicitados a responderem sobre o princípio da incerteza, eles não conseguem estabelecer diferenças entre os observáveis clássicos e quânticos. Parecem não entender que na MQ nem sempre os observáveis são compatíveis entre si, como por exemplo, determinar simultaneamente a posição e o

momento linear para um objeto quântico. Apesar de o professor ter descrito coerentemente o princípio da incerteza, mostrando suas equações heurísticas e dentro de uma visão única de interpretação, não houve uma compreensão satisfatória para o que significa esse princípio, uma vez que seus parâmetros (posição e momento, energia e tempo) estão fortemente atrelados aos nossos conceitos clássicos de partículas, reforçados pela quantificação do princípio a partir de dois exemplos (um elétron e um grão de areia) resolvidos no quadro, dando ênfase à impossibilidade de conjecturar esse princípio no mundo macroscópico. Além disso, o princípio foi apresentado sem nenhuma correlação com o postulado quântico que lhe dá origem.

A partir da resposta do aluno A2S, fica perceptível que o mesmo ao se referir à simulação observada por ele na NET, facilitou a sua compreensão, inclusive acrescentando à sua resposta um elemento novo (a lâmpada), que não foi abordado em sala de aula, no papel do observador. Nas últimas décadas, vários experimentos envolvendo a interferometria com poucas partículas quânticas têm sido desenvolvidos, a exemplo de Tonomura et al. (1989), cujos resultados propiciam uma melhor compreensão desse fenômeno, ao tempo que corroboram o que se afirma nos postulados quânticos.

Percebemos durante essas aulas, a necessidade de o professor descrever todo o aparato matemático para alguns potenciais particulares, dando a falsa impressão de que dominando essa descrição, certamente seus conceitos seriam compreendidos pelos alunos ou talvez que esses conceitos fossem de compreensão dispensável. A partir do que os alunos escreveram nas respostas acima, ocorreu exatamente ao contrário. Esperávamos uma concentração maior de respostas no operacionalismo da proposição (c), no entanto os alunos não a responderam, parecendo-nos que nem no formalismo e nem no teórico, houve uma compreensão satisfatória.

5.1.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS – UFBA

Ao longo das observações realizadas em sala de aula ou na análise de suas provas e entrevistas, constatamos várias discrepâncias, com relação aos assuntos que envolviam conteúdos realmente quânticos. Se por um lado o professor descrevia alguns fenômenos quânticos utilizando ou incorporando elementos clássicos em suas explicações, por outro, os alunos absorviam tal abordagem, expressando reações de continuidade da Física Clássica, como fruto apenas de uma “ruptura”, acrescentando-lhe elementos novos, como por exemplo, o fóton, que tem uma “dualidade” a seu favor, podendo passear por entre essas analogias. Esse tipo de concepção ou analogia foi constatado por Olsen (2002), quando examinou estudantes pré-universitários, na Noruega, verificando que a maioria deles ressalta uma dualidade onda-partícula muito vaga para a luz, não conseguindo arguir em favor da mesma dualidade para os elétrons.

Para assuntos como o efeito fotoelétrico, as respostas dadas na prova pelos alunos observados mostram que a grande maioria deles demonstrou uma boa compreensão do fenômeno, desvinculando corretamente a intensidade da radiação incidente com a energia dos elétrons emitidos pelo metal, atribuindo essa liberação a uma determinada frequência dessa radiação.

Em se tratando da questão sobre modelo atômico de Bohr, a maioria dos respondentes associa esse modelo ao de Rutherford, imaginando elétrons como “bolinhas” que giram em torno do núcleo, mantendo suas órbitas definidas, absorvendo ou liberando energia na mudança de órbita e com uma estrutura semelhante ao sistema solar. Essas são premissas bastante arraigadas nas concepções dos alunos, parecem vir ainda do Ensino Médio e foram fortemente reforçadas durante as aulas, no contexto de que a ideia de “bolinha” foi constantemente mencionada por professor e alunos, não só nessa aula, mas também durante o experimento da dupla fenda. Vez ou outra o professor enfatizava que o elétron é uma “bolinha”, o que terminou por disseminar entre os alunos uma perspectiva clássica para as partículas microscópicas. Possivelmente, por causa desse reforço na falsa concepção para elétrons, como nos observa Greca et al. (2001, p.15), muitos dos alunos que cursaram a disciplina de MQ em sua pesquisa, continuaram associando conceitos clássicos a fenômenos quânticos.

Não houve por parte do professor, nenhuma utilização de tecnologias associadas ao ensino. Recursos do tipo áudio visual, experimentos virtuais e outras ferramentas metodológicas não foram usados durante suas aulas, resumindo-se ao ensino tradicional com uso de lápis e quadro branco. O professor repete um modelo de ensino de sua época de graduação no curso de Bacharelado em Física, com aulas predominantes expositivas, inclusive recorrendo a e utilizando os mesmos instrumentos classificatórios de avaliação. A sua ideia de formação de professores parece ser ainda pautada no modelo tradicional, ou seja, na reprodução de conhecimentos cristalizados, prontos.

Na entrevista, ele admite suas limitações para o ensino da disciplina Estrutura da Matéria I para licenciandos, dizendo-se iniciante e angustiado com o rumo que ela poderia tomar. Faz crítica à estrutura da atual disciplina, incentivando os alunos a irem ao departamento de Licenciatura em Física, solicitarem uma disciplina introdutória de MQ, exclusiva para licenciandos, em que a “dualidade” fosse o pilar central desse curso. Embora tenha demonstrado uma preocupação com aquela disciplina que havia lecionado, tendo em vista que não era uma disciplina própria para os ensinamentos dos fundamentos quânticos, quando teve, no final do curso, a oportunidade de ensinar somente os princípios quânticos, ele não o fez, continuou enfatizando uma essência semi-clássica, apelando fortemente para o aspecto matemático.

Esse procedimento distanciou suas aulas das competências e habilidades sugeridas pelas Diretrizes Curriculares Nacionais, para a formação de professores. Isso ficou notório, por exemplo, quando nas aplicações de autovalores do observável energia, para alguns potenciais particulares (poço infinito, degrau de potencial e barreira de potencial), exigiu-se apenas o raciocínio dedutivo, fazendo com que os alunos decorassem uma sequência de resolução, ao invés de alertar, também, para uma compreensão das bases conceituais decorrentes desses fenômenos analisados e de suas relações com o funcionamento e o uso de equipamentos tecnológicos recentes, a exemplo dos microscópios de tunelamento.

A maioria dos alunos observados admite a existência da difração e da formação de um padrão de interferência para ondas. No entanto, quando da explicação relativa à difração de fótons ou de elétrons, pelo menos os alunos A1S, A5S e A6S, não demonstraram segurança, em especial quando no experimento era solicitado apenas um fóton por vez. Essa insegurança também foi verificada pelo trabalho de Ostermann e Pereira (2009).

Seus resultados mostram que a maioria dos estudantes, licenciandos em Física, tem dificuldades em reconhecer em quais situações os objetos quânticos (fótons e elétrons) apresentam um comportamento tipicamente corpuscular ou ondulatório.

Um dos alunos observado, A4S, pergunta como isso seria possível¹⁶, não obtendo uma resposta esclarecedora do professor e nessas circunstâncias, o professor usou novamente a questão da “dualidade” como aporte para explicar essas estranhas aparências dos fótons/elétrons, como partícula ou como onda:

- Tudo isso pessoal, é muito estranho! Isso é a dualidade. Os elétrons e demais partículas subatômicas não são nem partículas clássicas e nem ondas clássicas. E como conciliar essa coisa? Isso só foi resolvido com a interpretação probabilística de Max Born (P1S);

Em aulas subsequentes, utilizando o mesmo experimento, o professor utilizou, como exemplos, balas de uma metralhadora incidindo sobre as fendas e, posteriormente, elétrons emitidos por uma fonte térmica aquecida. Ao comentar a experiência, o professor não deixa clara a relação entre o diâmetro das balas e as larguras das fendas, gerando dúvidas, que levaram o aluno A2S a perguntar por que não via aquilo acontecendo no dia a dia. Como resposta o professor apenas desenhou no anteparo pontinhos representativos do toque das balas e no outro anteparo diversos pontinhos brilhantes de elétrons incidentes, com ênfase a uma maior concentração atrás das fendas. Não houve preocupação em mostrar esses experimentos de outra forma, inclusive não dando ênfase à contribuição do aluno A2S, quando sugeriu o uso de dois experimentos virtuais, encontrados na internet, os quais, segundo o aluno, mostravam os fenômenos sugeridos pelo professor naquela aula, de forma gráfica, ilustrativa e mais concreta, facilitando a compreensão dos conceitos quânticos ali envolvidos.

Nas revisões bibliográficas de Ostermann e Pereira (2007) e Greca & Freire Jr. (2012), encontramos resultados de pesquisadores que produziram e aplicaram bons experimentos virtuais, encontrando satisfatórios resultados de aprendizagem, em relação a alguns fundamentos teóricos da MQ. No entanto, poucos desses experimentos e seus resultados são divulgados e terminam por não chegar aos professores do Ensino Médio. Entendemos que estimular e promover o contato dos alunos com essas ferramentas,

¹⁶ Segundo Zeilinger et al. (2003), experiências como essas já foram realizadas e seus efeitos com sistemas quânticos, já foram observados.

notadamente, deverá produzir uma compreensão mais acentuada de determinados conceitos quânticos. O professor em questão parece não ter despertado para essa premissa, preferindo ressaltar que o acúmulo de elétrons, no ponto central do anteparo, representava a superposição construtiva, típico de uma interferência quântica e que essa maior intensidade denotava uma maior probabilidade de atuação dos elétrons naquele local, resolvido através da interpretação probabilística de Max Born. Nesse contexto, o professor explica o problema da medida, sem explicar o postulado que lhe dá origem, apenas usando expressões como: “... se você medir, altera o estado do sistema, ou seja, as franjas de interferências viram bolinhas”.

Percebemos, ao longo das aulas descritas acima, que ele baseou suas explicações na interpretação usada por Bohr. No entanto, percebemos que ele fez isso não por ter dado um caráter filosófico ao contexto de suas aulas, até porque ele nunca teve contato em sua formação com esses aspectos filosóficos da MQ, como ele mesmo informou na entrevista, mas muito mais por intermédio do livro texto Eisberg e Resnick (1979), que fundamenta suas informações na interpretação de Copenhague (inclusive reservando uma seção na página 113), para abordar a filosofia da MQ. Notadamente, por duas vezes ao longo do curso, o professor cita Bohr, quando afirma:

- Para Bohr, um fenômeno é ou corpuscular ou ondulatório, mas nunca os dois ao mesmo tempo.
- Para Bohr, não faz sentido perguntar por onde o elétron passou.

Além disso, não houve em nenhum momento do curso, interesse em outras interpretações para os poucos fenômenos quânticos ali abordados.

Apesar das muitas informações dadas pelo professor, notamos que poucas reflexões foram realizadas e conceitos importantes foram relegados a rápidas informações, às vezes distorcidas ou insatisfatórias, a exemplo do conceito de estado quântico, que foi introduzido de maneira inequívoca, tornando-o análogo ao estado clássico, na vã tentativa de aproximar os alunos de uma fenomenologia propriamente quântica. Apesar de ter trabalhado todo aparato matemático da função de onda, através da equação de Schrödinger, quando solicitado a responder sobre o conceito de estado quântico, o professor termina definindo um “observável” clássico, deixando os alunos confusos e sem uma noção de estado e observável quânticos:

- Você sabe definir o estado de um objeto clássico? Então, é a mesma coisa... É... Quando você determina a posição de um objeto dentro da sala, através de sua velocidade, momento, energia, tempo, etc.

Quando perguntamos aos alunos, na entrevista, o que eles entendiam por estado quântico, pelas respostas ali apresentadas (quadro 2), a maioria demonstrou insegurança e falta de conhecimento, com definições voltadas para os conceitos clássicos de sistemas macroscópicos, como por exemplo, o estado termodinâmico. Nas respostas apresentadas na segunda prova, quando solicitados a responderem sobre o princípio da incerteza, eles não conseguem estabelecer diferenças entre os observáveis clássicos e quânticos. Parecem não entender que na MQ nem sempre os observáveis são compatíveis entre si, como por exemplo, determinar simultaneamente a posição e o momento linear para um objeto quântico, com a mesma precisão.

Em nossas conversas iniciais e informais, o professor nos alertou para uma discrepância existente entre licenciandos e bacharelados, demonstrando que na formação do professor de Física não lhe é necessário um aprofundamento maior da MQ, apenas uma moderada compreensão da sua ruptura com a Física Clássica. Sentimos ainda, em sua declaração, uma comparação entre os licenciandos do turno da manhã com os do noturno, aprovando que no turno da manhã haja uma relação natural e benéfica entre os bacharelado e licenciandos, de tal forma que há um núcleo comum entre os cursos, e que a disciplina Estrutura da Matéria I é ministrada exigindo um alto nível de conhecimento por parte dos alunos, ou seja, o conhecimento físico que o licenciando deve adquirir, deve se amoldar ao do bacharelado, o que não ocorre no curso noturno.

Isso tem sido uma prática comum em diversos Departamentos de Física de algumas Universidades brasileiras, a exemplo da UFPE e UFBA, como tivemos a oportunidade de observar, contrariando o que determinam as Diretrizes Curriculares, em que se conclama que a Licenciatura em Física deve ter uma identidade própria que sinalize para a formação do professor. Por outro lado, quando perguntamos se os alunos sentiam-se aptos a ensinarem conteúdos ligados à MQ no Ensino Médio, a maioria respondeu em função do reconhecimento de dificuldades formativas frente a alguns assuntos. No entanto, essa maioria mostra-se propensa e interessada em discutir esses assuntos, mesmo que alguns alunos não se sintam preparados para essa tarefa.

5.2 O CASO DA UEPB

Iniciamos nossa pesquisa na UEPB em fevereiro de 2010, acompanhando primeiramente seis alunos na disciplina de Física Moderna até junho do mesmo ano. Posteriormente, esses alunos, a partir de julho, passaram a cursar, paralelamente à disciplina de Física Moderna, outra disciplina de quatro créditos, Mecânica Quântica, lecionada por outro professor, cujas ementas se encontram em anexos e que fazem parte do fluxograma do curso de Licenciatura em Física. Após um mês de aulas da disciplina de MQ, alguns alunos desistiram, dentre eles um dos que estávamos observando. Assim sendo, a nossa amostra foi reduzida para cinco alunos, em ambas as disciplinas. A partir de julho de 2010, não mais acompanhamos a disciplina de FM, pois conforme a sua ementa, os assuntos que seriam abordados a posteriori (teoria da relatividade e física das partículas), não eram o foco da nossa pesquisa, uma vez que estávamos interessados na formação desses licenciandos em teoria quântica.

Considerando que as relações que a sala de aula envolve são muito pessoais e, assim sendo, o professor parece sentir-se ali perigosamente exposto, por trabalhar não apenas com a razão, mas com toda sua pessoa e suas incertezas, procuramos os professores (P1) e (P2) que iriam lecionar as disciplinas de FM e MQ, respectivamente, explicando-lhes que os motivos que conduziam a nossa pesquisa passavam por aquelas disciplinas que eles iriam lecionar. Fomos prontamente atendidos e, conseqüentemente, após a explicação da pesquisa para os alunos, não houve nenhuma resistência à nossa permanência em sala de aula. O fato de sermos professor da Instituição, conhecido de alguns alunos e colega de departamento dos professores pesquisados, não atrapalhou a condução da pesquisa. Entretanto, no seu início, notávamos certa insegurança ou preocupação com o desenvolvimento das aulas e suas aplicações, a ponto do professor (P1) nos perguntar:

- Estou no caminho certo, dentro de suas expectativas?

Informamos-lhe que o curso da disciplina não poderia ser pensado em função da nossa presença, mas tão somente do que eles acreditam que o licenciando em Física precisa saber para ter uma boa formação nos conceitos relativos à MQ.

Para uma compreensão mais significativa das descrições e comentários postos aqui, é importante esclarecer que não seguimos uma linearidade, contemplando uma disciplina

por vez, como fizemos na UFBA. Ao contrário, ousamos passear por entre as duas, na tentativa de resgatar a partir das nossas observações, das provas e entrevistas, possíveis nuances que sugerem contemplar ou não a formação do licenciando nos fundamentos da MQ. Nesse passeio, para uma mesma plateia, observamos variadas posturas para o ensino desses fundamentos. Por um lado, havia um professor que incorporou inicialmente em algumas aulas, elementos didáticos ligados às novas tecnologias, como vídeos e experimentos virtuais, além do aspecto matemático; por outro, havia um outro que não contemplou essas ferramentas, fez pouca incursão pelo aspecto conceitual, dando mais ênfase ao formalismo matemático. Na verdade, poucas incursões conceituais foram realizadas em ambas as disciplinas.

Nos primeiros dias de aula, quando comentavam com seus alunos sobre o andamento de suas disciplinas, eles expuseram os objetivos de suas disciplinas:

- O objetivo desta disciplina é apresentar de forma propedêutica os conhecimentos sobre a teoria da relatividade e a teoria quântica, apresentando os fenômenos através de ferramentas matemáticas. Tudo isso, voltado para uma sustentação à MQ e ao eletromagnetismo. (P1);
- O mais complicado é entender os conceitos, a matemática é fácil; a teoria não faz parte do nosso mundo. Vocês não vão levar isso para o Ensino Médio, serve como conhecimento geral. O assunto não é moleza... Portanto, estudem. (P2).

Quando perguntados, na entrevista, sobre os objetivos de suas disciplinas, responderam:

- É apresentar os conceitos da física do século XX, usados no dia a dia, sem o uso da física clássica. (P1).
- ...é fazer com que os alunos tenham uma visão matemática e conceitual dessa nova teoria, que faz parte da grade curricular deste curso, como também do dia a dia desses alunos... é trabalhar o aspecto matemático da quântica (P2);

Como podemos perceber, em ambos os comentários, os professores contemplam o aspecto matemático peculiar a essas disciplinas, mas também apontam seus objetivos para o entendimento das características dos sistemas quânticos ou dos postulados quânticos, possíveis de ser apresentados e discutidos em sala de aula, uma vez que são premissas concretas e em franca expansão tecnológica, presentes no nosso dia a dia. Dentro dessa perspectiva, perguntamos aos alunos como eles vivenciaram essas disciplinas:

- Na FM deu pra assimilar alguma coisa; já em MQ, assim, eu senti dificuldades no formalismo matemático... Não houve conceitos, né? (A1);
- Em FM não consegui compreender muita coisa no começo, tinha muitos slides e eu sou péssima nisso. Em MQ, no início, senti dificuldades. Depois fui melhorando. Fazia as contas, mas não sei explicar. (A2);

- Rapaz,...eu particularmente senti muitas dificuldades...perdi algumas aulas. São disciplinas que não tem tanto conceitos, né? E a parte que fundamenta a teoria é bastante pesada. (A3);
- Assim, de forma interessante. Em FM a parte conceitual é melhor e menor do que o formalismo matemático. Já em quântica, a coisa foi muito mais matemática forte, deixando a desejar a parte conceitual. (A4);
- As duas são disciplinas complexas. Não se faz muitas analogias. Eu gostei bastante, tanto de uma como da outra. Eu acho que o que falta, às vezes, é um pouco mais de argumentação, em cima, né? Assim, por menor que seja, ela deve existir, no sentido de alertar para que serve tudo aquilo. (A5).

As manifestações aqui apresentadas denotam a forma com que os assuntos relacionados à MQ foram trabalhados nas duas disciplinas, enfatizando-se fortemente os aspectos matemáticos, em oposição a uma abordagem mais conceitual, conforme se verifica nos depoimentos dos alunos. Quando o professor (P2) reiteradas vezes dizia em sala de aula: “O importante é dominar uma estratégia para resolução de diversas formas de problemas quânticos”, estava defendendo junto aos alunos, que quanto mais exercícios eles resolvessem, treinando questões parecidas e repetitivas, mais aptos eles estariam para entender os conceitos envolvidos nas diversas situações-problema, com os quais os alunos se deparariam. O ensino dessas disciplinas, realizado dessa forma, é considerado árduo pelos licenciandos e não consegue estimulá-los a ensinar tópicos dessa teoria no Ensino Médio, pois afinal, como A2 disse na entrevista: “como vamos ensinar MQ no ensino médio se só fizemos conta, com uso de equações diferenciais”.

Por outro lado, os professores observados foram unânimes em afirmar, na entrevista, que os conceitos de MQ mais importantes para a sua compreensão são: a quantização, a função de onda, a dualidade, a incerteza e a densidade de probabilidade. Perguntamos também a esses professores, por que eles acreditam que esses são os conceitos mais importantes para a MQ:

- Esses conceitos estão atrelados às novas tecnologias utilizadas no dia a dia, então como o intuito é formar cidadãos conscientes, que possam utilizar isso aí e também por serem professores e caracterizar isso com seus futuros estudantes. (P1);
- É importante porque são conceitos que fazem parte da MQ, que é uma teoria atual, faz parte do dia a dia. Mesmo que eles não saibam e mesmo que os objetivos do curso não sejam tratar dos aspectos aplicados às tecnologias, a gente tem que discutir a ciência pela ciência. (P2).

Comparando essas declarações com as provas realizadas (em anexo) e com as listas de exercícios aplicadas aos alunos, percebe-se de forma muito tímida a solicitação de aspectos conceituais e observa-se mais a presença de questões com enunciados do tipo: comprove a equação, determine..., deduza..., etc. Foi observada pouca contextualização dos problemas sugeridos em suas provas e listas de exercícios, de forma a torná-los

mais próximos de situações reais, de modo a permitir que se levantem hipóteses, possibilidades de investigações.

Para exemplificar o que estamos afirmando, foi solicitado aos alunos que resolvessem um problema em sala de aula, a partir de uma situação atípica: o professor (P1) propôs que os alunos determinassem o comprimento de onda de um avião e de um elétron, com suas respectivas massas e velocidades, em relação à possibilidade de difração de ambos em uma determinada fenda. Ao finalizar os cálculos, o professor (P1) pergunta:

- Qual deles é forte candidato à difração? O elétron com $\lambda = 6,64 \times 10^{-11}\text{m}$ ou o avião com $\lambda = 2 \times 10^{-41}\text{m}$?
- Vocês não respondem? Então observem a massa do avião passando por uma fenda que tenha, pelo menos, o valor do seu comprimento de onda; isso é possível?

Aqui, a preocupação do professor foi de levar os alunos a uma compreensão conceitual em função do comprimento de onda para objetos macroscópicos e a razão pela qual o seu comportamento ondulatório não é percebido no dia a dia. Pela reação dos alunos observados, o exemplo parece não ter despertado o objetivo pretendido pelo professor, que era, possivelmente, despertá-los para a compreensão de ruptura entre o mundo macro e o micro. Além disso, o exemplo traz, para o tratamento de assuntos de Física Moderna, os mesmos equívocos, em termos metodológicos e curriculares, que já foram apontados em diversos estudos sobre o ensino de Física. É preciso estabelecer uma ação educativa mais forte, como sinalizam Grega e Herscovitz (2002), no sentido de priorizar exemplos baseados em experimentos recentes e em discussões que apontem para características propriamente quânticas, em oposição às abordagens clássicas ou que só oferecem uma visão instrumentalista.

Dentre as quatro avaliações realizadas nas disciplinas descritas, encontramos apenas quatro questões conceituais que solicitavam dos alunos que descrevessem ou justificassem as situações, usando o que eles tinham apreendido em sala de aula. Vejamos:

1. O efeito Compton é uma evidência da natureza corpuscular ou ondulatória da luz? Justifique sua resposta. (primeira avaliação em FM);
2. Fale sobre o dualismo onda-partícula. Use o experimento da dupla fenda para mostrar esse comportamento. (segunda avaliação em FM);
3. (a) Como podemos definir um operador Hermitiano? (b) Os operadores que representam quantidades físicas podem ser não-Hermitianos? (primeira avaliação em MQ);

4. Do ponto de vista da MQ, quando poderemos afirmar que uma grandeza física é uma constante de movimento? (segunda avaliação em MQ).

Apenas dois alunos, A1 e A4, responderam de forma convincente a questão (1) acima, mostrando algebricamente o espalhamento e comentando a diminuição da frequência da luz espalhada em função do ângulo de espalhamento. A propósito dessa questão, observamos, em sala de aula, o esforço de ambos, professor (P1) e alunos, para entenderem a mudança no comportamento da luz, passando de um aspecto ondulatório para o aspecto corpuscular ou vice-versa, usando experimentos virtuais. Para a comprovação do que estava dizendo, o professor (P1) mostra e comenta um applet (física com ordenador) com uma experiência (efeito Compton), na comprovação do fóton como partícula, sua colisão, o ângulo de espalhamento, etc. Várias perguntas foram elaboradas, no entanto algumas chamam a atenção pela tensão no diálogo, provocando certo desconforto na turma e no professor. Vejamos:

- Qual a diferença entre efeito fotoelétrico e efeito Compton? (A2);
- Segundo Einstein eles são opostos. (P1);
- Como conciliar o modelo corpuscular com um comprimento de onda ou uma frequência? Isso vai dar zebra...risos. (A2);
- Pela teoria ondulatória esse fato não pode ser explicado (P1);
- E então?...Por que não dá certo com a teoria ondulatória? (A2);
- Porque existe uma diferença entre os comprimentos de onda incidente e refletido. (P1);
- E agora a radiação se comporta como onda ou como partícula? (P1);
- A teoria ondulatória não explica, mas e o comprimento de onda na equação, o que ele tá fazendo lá? (A2);
- Você tem que aplicar o modelo corpuscular, como vimos na experiência. Aplicando o modelo ondulatório da radiação não há uma explicação convincente para tal. (P1);
- E o modelo corpuscular convence? (A2);
- Por enquanto vocês vão ter que aceitar. (P1)
- Deixa pra lá...(A2).

A partir dessas discussões, o uso de simulações realizadas em sala de aula facilitou para alguns alunos a visualização do efeito Compton, ajudando-os a compreender o fenômeno em questão. Por outro lado, a partir da discussão acima e em algumas que relataremos abaixo, percebe-se o quanto foi acalorado o nível de desentendimento sobre o porquê de associar um comprimento de onda ao fóton, tomando-o como uma partícula. Essa mesma dificuldade conceitual encontramos em outros trabalhos disponíveis na literatura, a exemplo de Greca e Herscovitz (2002); Ke et al. (2005); Olsen, (2002); Ostermann e Ricci (2004), quando acentuam que esses desentendimentos e essa falta de clareza, por parte dos estudantes e professores, são reflexos de uma abordagem semiclássica utilizada nas disciplinas introdutórias de MQ, com um enfoque demasiadamente centrado nos aspectos históricos da teoria.

Ninguém respondeu à questão (2) apresentada como um dos conceitos mais importantes da MQ. Houve importantes discussões em sala de aula, que consideramos pertinente relatá-las e brevemente comentá-las.

Durante a aula sobre a dualidade onda-partícula, o professor (P1) mostra um vídeo pela internet, conhecido como “Dr. Quantum”, em que realiza uma experiência virtual utilizando-se de uma dupla fenda, na qual são lançados diversos tipos de partículas (clássicas e quânticas). Inicialmente, o professor fez incidir balas sobre as fendas:

- Vocês esperavam isto? Tem alguma coisa de diferente? (P1).

Houve vários comentários, demonstrando que aquilo já era esperado. Houve ressalvas a respeito do “tamanho” das balas e do “buraco” das fendas.

- Vamos diminuir o “tamanho” das fendas, suficientes para fazer passar a luz por ali. O que vocês esperam? A mesma coisa das balas? (P1).
- Claro que não né pessoal. Vejam o padrão de interferência, típicos de uma onda. (P1);
- Vamos melhorar o experimento. Vou jogar uma luz bem fraquinha, de forma a lançar um fóton por vez. E agora, o que vocês esperam? (P1);
- Tendo em vista que fótons são partículas, a mesma coisa das balas, né?. (A3);
- Acho que sim. (A2);
- Eu já vi esse vídeo... mas não entendi nada. (A4).
- Concordo com (A3). (A5).
- Surpresos!..., risos..., o padrão de interferência apareceu. Fantástico, não? (P1).

Boas explicações surgiram da realização desse experimento. Notadamente, o professor (P1) já havia argumentado a favor do desenvolvimento histórico da luz, expondo sua comprovação experimental como onda, através de Hertz, e posteriormente o caráter corpuscular na explicação dos efeitos fotoelétrico e Compton. Nesse sentido, era de se esperar que esses experimentos gerassem um paradoxo, deixando os alunos confusos, precisando de esclarecimentos. Para essa situação, o professor argumentou em função de que “partícula ou onda são definidos a partir do resultado do experimento realizado, ou seja, dependendo do experimento a luz poderá revelar sua natureza corpuscular ou ondulatória; isso é a dualidade”. Continuando:

- Como se difrata um fóton? (A2);
- O fóton é uma onda? Não...ela é uma partícula mediada por uma onda.(P1);
- Professor não é fácil engolir essa estória do fóton. Ele é partícula ou onda? E sem massa? (A1);
- Partícula é uma coisa sem dimensão; ou massa concentrada num ponto. Vocês me irritam (P1);
- O que é a luz afinal? (A4);
- É uma onda eletromagnética. (P1)
- Os efeitos fotoelétrico e Compton são a chave para pensar o fóton como partícula (P1);
- Como pode ser partícula se não tem massa? (A2);
- O fóton é equivalente a uma partícula hipotética com massa? É isso?(A2)
- Aceitem isso, é a natureza do fóton. (P1).

Nessa discussão, percebemos que a “compreensão da dualidade onda-partícula”, apontada pelos professores como um dos assuntos importantes da MQ, só foi possível quando o professor (P1) associa uma onda ao fóton, dando-lhe um caráter diferente do restante dos experimentos que até então vinha desenvolvendo. Notadamente, essa premissa foi levemente aceita pelos alunos, gerando contradições. Contra fatos não há argumentos ou nas palavras do professor (P1): “Aceitem isso, é a natureza do fóton”. Outro fator que observamos e que foi relevante na “aceitação” do fenômeno, ocorreu com o uso do experimento virtual, quando oferece a oportunidade de “observar” algo contraditório, do ponto de vista clássico, acontecendo. A esse respeito, Pereira (2008) utilizou, em sua pesquisa, o conceito de dualidade onda-partícula como eixo principal e articulador das discussões em sala de aula, numa turma de licenciandos da UFRGS, usando um software que simula o interferômetro virtual de Mach-Zender para partículas quânticas. Seus resultados apontam que as ações instrucionais mediadas pelo uso desse aparato virtual auxiliaram no processo de compreensão por parte dos alunos, viabilizando a aceitabilidade de conceitos abstratos ou que fogem ao senso comum.

Continuando o experimento a partir do que eles observaram, ou seja, lançando continuamente um fóton por vez e formando o padrão de interferência na tela de detecção, o professor (P1) sugere aos alunos que eles tentem indicar por onde o fóton passou: “se na fenda da direita, na fenda da esquerda ou nas duas”. Vários alunos informaram por onde o fóton passou, mas sem uma relação contextual própria do conhecimento científico, muito mais pelo tentar “adivinhar”.

No contexto das aulas dadas até o momento da realização desse experimento, P1 não havia argumentado em favor de alguma interpretação que favorecesse a exploração desse assunto. No entanto, indiretamente mostrou-se favorável a interpretar o fenômeno, usando a dualidade partícula-onda, afirmando que “após a passagem da fenda o fóton interfere consigo mesmo, sendo impossível detectar por qual fenda ele passou e quando tentamos fazer isso o fenômeno torna-se corpuscular, devido a sua natureza excludente. Vejam isso no experimento”.

- Como é..., o fóton interfere com ele mesmo? Juro que não entendi..., risos (A2);
- É a interferência da onda que guia o fóton, certo professor? (A5);
- Pois é..., é a natureza do fóton..., vocês têm que conviver com isso (P1).

Para aceitarmos que o fóton passa por ambas as fendas simultaneamente, produzindo um padrão de interferência na tela, temos que provê-lo de uma função de estado que

gere uma superposição linear, embora o detector deva medir o fóton em uma distribuição probabilística. E assim sendo, não tem sentido perguntar por onde o fóton passou. Em síntese, o Princípio da Complementaridade não aceita que os aspectos, ondulatório e corpuscular, coexistam simultaneamente. Isso não foi mencionado e nem discutido com os alunos, sendo também uma oportunidade de inserir o Princípio da Incerteza. O aluno (A1) parece ter percebido essa contradição, argumentando com alguns dos seus colegas após a aula, dizendo:

- É mais fácil aceitar que o fóton seja guiado por uma onda e que essa é que deverá interferir nas fendas, né? (A1);
- Minha dúvida é a seguinte: se a onda guia a partícula, como o professor disse, então na mesma situação pode existir os dois? E a exclusão simultânea deles...? (A1).
- Deles quem? (A3);
- Da onda e da partícula. (A1)
- Sei lá cara, deixa isso pra lá..., tu quer ficar doido é?... (risos) (A3).

Todos responderam à questão (3), no entanto só os alunos A1 e A4 deram respostas aceitáveis. O primeiro aluno apresenta sua resposta à letra (a) em forma de demonstração matemática, tomando como exemplo o operador momento (p) e seu valor esperado $\langle p \rangle$, postulando que se $\langle p \rangle - \langle p \rangle^* = 0$, então $\langle p \rangle$ é real e (p) é Hermitiano. Enquanto isso, o aluno A4 escreveu:

- Um operador é Hermitiano quando seu valor esperado é real, para qualquer valor admissível. Dessa maneira, a diferença entre o valor esperado de uma função e o valor esperado do seu conjugado deve ser nula.

Para a letra (b) dessa questão, ambos deram a mesma resposta, postulando que:

- Não. Todos os operadores que representam quantidades físicas devem ser Hermitianos, devido à necessidade de encontrarmos sempre valores esperados do operador, reais para as funções que descrevem a situação analisada.

Embora o aluno A4 tenha dado uma resposta incompleta, trocando “toda função de onda admissível” por “qualquer valor admissível”, ele ressalta que o valor esperado é real. Mesmo assim, o professor não considerou sua questão. Enquanto o aluno A1, que demonstrou todos os passos matemáticos, foi contemplado. Em sua explicação, o professor (P2) argumentou durante a correção da prova em sala de aula, que “a linguagem matemática utilizada na MQ não é trivial e deve obedecer a um espaço vetorial, constituído pelo espaço de Hilbert, que é um espaço matemático muito... muito... abstrato. Portanto, deve ser diversas vezes treinada, repetida... não vale conceituar o que é abstrato... é loucura... não tentem isso!... a demonstração realizada deve falar por si... ela me diz tudo que eu preciso”.

Ao perguntarmos aos professores “o que você espera que seus alunos aprendam?”, eles responderam:

- Outro modo para descrever a natureza, não como se pensava antes, de maneira contínua, mas de forma discreta, outro comportamento que a matéria apresenta né? São outros conceitos, né..., não do nosso cotidiano, mas que dão suporte a elementos ou equipamentos tecnológicos que utilizamos no nosso dia a dia. (P1);
- Espero que eles aprendam e entendam os conceitos inerentes a MQ e como aplicá-los a problemas físicos. Entendam como é que o conceito onda-partícula na MQ deixa de ser válido; entenda o conceito de função de onda, o que significa o seu módulo ao quadrado, onde se aplica, como você utiliza essa função de onda para discutir o problema da MQ. Ai agente faz alguns exemplos, com o oscilador harmônico, etc. Não posso ir mais além, trazer um pouco do dia a dia, porque precisaria de mais consistência na MQ. Não é fácil fazer a ponte entre as aplicações tecnológicas, porque os assuntos não são simples. O laser, por exemplo, seria interessante, mas para tratar disso na aula, eu precisaria ir até o curso de MQ II. Então, não há como falar sobre isso, se os assuntos tratados nessa disciplina, não te dar suporte para tal. (P2)

Na visão desses professores, possivelmente esses alunos não terão dificuldades em, pelo menos, descrever conceitualmente a natureza, sendo capazes de entender toda ferramenta que há por trás dela. Ao perguntarmos aos alunos na entrevista se eles tiveram dificuldades em termos de conceitos e de resolução de problemas, nas disciplinas descritas, tivemos as seguintes respostas:

- Em termos de conceitos foi pouco abordado e quanto à resolução de problemas, precisava entender o que estava fazendo. Terminou sendo um curso mais técnico, mais mecânico, onde a essência que era a teoria ficou a desejar. (A1);
- Conceitos. Eu não sei se foi só comigo, mas não ficou nada. Agora..., de resolução de problemas, eu faço, eu fiz com ajuda dos amigos, mas foi tudo muito automático. (A2);
- Tive sim..., com certeza em resolução de problemas. Por que..., é..., os conceitos, em si, são bastante..., não quero dizer escassos, sei lá, são poucos em relação ao tratamento matemático que você tem que fazer. E aí você perde mais na matemática, do que na física da coisa; são cursos mais mecânicos, menos conceituais. (A3);
- Tive na parte conceitual, pois o formalismo matemático a gente sabia usar, não sabia que informação ele trazia, qual o significado daquelas contas. É... , assim como você chupar um bombom, sem saber de que ele é, o seu sabor, sabe, a essência. Essas disciplinas, não nos deram nenhum entendimento da matéria, como prometeu a ementa do curso. Assim..., é diferente, sabe. Por exemplo, nas outras físicas, você sabe definir as coisas, você entende o que é calor, corrente elétrica, você vê as coisas acontecendo. No entanto, nessas disciplinas isso não foi possível. Não há conceituação, é só conta e mais conta... Cada uma mais difícil que a outra. E no final? Nada. Provou? Provei e daí? Pra que serve isso? Sei não. (A4);
- Sinceramente, assim... Matematicamente ainda dá pra desenvolver algumas contas, mas em termos conceituais, eu não sei se tenho uma boa base não. É justamente o que as tornam difícil... É resolver problemas.

A maioria dos respondentes foi enfática ao afirmar que não sentia segurança em relação ao aspecto conceitual dos fundamentos Quânticos, que foram cursos meramente técnicos, e que as “contas” não tinham significados. Assim, percebemos que há uma disparidade entre as respostas dos dois grupos. Essas mesmas dificuldades foram encontradas por Singh (2008-a), quando realizou um levantamento sobre a compreensão de conceitos e princípios da MQ, com estudantes do início do curso de graduação em

Física de sete diferentes universidades dos EUA. A análise dos dados mostrou que as dificuldades apresentadas em alguns temas, como equação de Schrödinger dependente do tempo, poços de potenciais e o formalismo associado ao experimento de Stern-Gerlach, são as mesmas para quase todos os estudantes analisados.

Para a questão (4) da nossa sequência, todos os alunos deram respostas convincentes, igual à resposta das notas de aulas do professor, que sugere:

“Considere um operador (θ) que não dependa explicitamente do tempo. Se $[\theta, H]=0$, (θ) será uma constante de movimento, ou seja, se o operador (θ) comutar com o Hamiltoniano, ele será uma constante de movimento, e como consequência, essa grandeza física associada ao operador (θ) é também uma constante de movimento”.

Na correção da prova em sala de aula, o professor (P2) volta a argumentar em favor das poucas evidências matemáticas, mas necessárias: “a teoria da MQ, apesar do seu enorme sucesso, não é intuitiva, ou seja, a gente não sai por aí vendo as coisas acontecendo, como no mundo do macro, do espaço euclidiano... entende? Temos que trabalhar bastante esse algebrismo abstrato, para compensar nossas intuições...”. Ao término da explicação dessa questão, o aluno (A1) diz que estudou esse assunto e ficou em dúvida se haveria alguma situação em que não se obteria o mesmo resultado, ou seja, a constância do movimento. O professor (P2) responde que essa correlação com o Hamiltoniano, será novamente explorada no Princípio da Incerteza.

Ambos os professores falaram de pacote de onda, função de onda, probabilidade, poços de potencial, etc., de modo que daqui para frente, poderemos inter-relacionar numa mesma perspectiva de análise seus pontos de vista, uma vez que se tratam dos mesmos alunos observados e que passaram pelas mesmas informações. A exemplo do que estamos falando, cada um dos professores definiu e explicou ao seu modo, o que era um pacote de ondas:

- É um fenômeno localizado que pode ser definido para um elétron. (P1);

Em seguida, equaciona duas ondas harmônicas (“do tipo sonora ou eletromagnética”) de forma a obter, algébrica e graficamente, a sua superposição e sua incerteza, acrescentando que assim como na mecânica clássica, na MQ teremos também essa incerteza. Por outro lado, o professor (P2) não define, mas usa as funções exponenciais, com o objetivo de determinar uma equação que descreve o pacote de onda mais a partícula. Ambos chegam aos mesmos resultados algébricos.

Para “mostrar esse pacote de ondas”, o professor (P2) desenha no quadro um gráfico representando o deslocamento dessa onda em função do tempo. Usa o princípio da superposição de ondas clássicas, para mostrar o pico que as torna construtivas. Informa que, à medida que o tempo cresce, a amplitude do pacote de onda diminui.

Para os próximos exemplos, a relação entre física clássica e MQ continua muito forte, utilizando-se do modelo clássico de ondas harmônicas na explicação do “Princípio da Incerteza”. O professor (P1) desenha no quadro um gráfico da função de onda $\Psi(x)$ versus x , representando um pacote de onda se alargando, sem dar um significado físico a esse modelo quântico. Relata que o pacote de onda é na verdade uma “justaposição de ondas localizada”. Em seguida, faz uma demonstração matemática que descreve o pacote de onda, calculando a sua largura e a densidade de probabilidade em posicionar um objeto quântico. O argumento é o mesmo, ou seja, assim como “o quadrado da amplitude das ondas harmônicas informam a densidade de probabilidade na Mecânica Clássica, na MQ é a mesma coisa, ou seja, aqui teremos o quadrado da função de onda, que vai definir essa densidade”.

Aqui, nos preocupamos com essas informações repassadas aos alunos, pois acreditamos que a natureza dessas densidades seja diferente, no sentido de que a amplitude da onda luminosa é definida por meio de leis clássicas (eletromagnetismo) e na verdade o quadrado dela é proporcional à densidade de probabilidade. Enquanto que a função de onda não tem uma definição prévia, ela já contém todas as informações sobre o sistema. Logo, o quadrado dessa função de onda, é a característica básica do princípio da superposição da MQ e não tem análogo na física clássica. Essas dificuldades no entendimento sobre a função de onda e suas importantes propriedades foram investigadas por Bilal e Erol (2007), junto aos alunos que participaram de suas pesquisas. Suas investigações apontam para dois tipos de incompreensão, a saber: a maioria dos estudantes pensa que a função de onda é adimensional e têm claras dificuldades em relacionar a função de onda com a densidade de probabilidade.

Continuando as aulas, os professores deduzem a expressão e definem o Princípio da Incerteza de Heisenberg, como:

- Um conhecimento acerca das propriedades de uma partícula, impondo limites. (P1);
- Aplica-se a objetos individuais com limites na possibilidade de medirem-se duas grandezas que não se comutam, simultaneamente. (P2).

Após as explicações e considerações próprias de cada professor sobre o princípio de Heisenberg, surgem algumas perguntas:

- Qual o significado disso aí? (referindo-se a $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2$). (A3);
- Significa que há uma constante, **um limite**, e que quando uma grandeza aumenta a outra diminui, **tornando-se imprecisas ao mesmo tempo**. (P1);
- Você **não pode determinar** a posição e o momento ou velocidade de uma partícula ao mesmo tempo. (P1);
- Professor pode ser assim: se for possível determinar o momento **perco informações** sobre a posição de uma partícula? E se eu tivesse um aparelho potente que não interferisse no sistema? (A1);
- E vice-versa, né. Pode. Não, o sistema não permite. Pense sempre **no limite da medição** exata e simultânea de **grandezas canonicamente conjugadas**. (P2).

Em uma das listas de exercícios, o professor (P2) solicitou dos seus alunos que respondessem a seguinte questão:

- Defina o Princípio da Incerteza de Heisenberg e dê exemplo.

Vejamos algumas respostas:

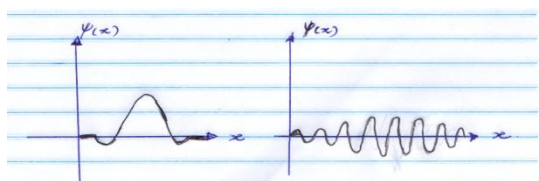
- Quanto mais precisamente se medir uma grandeza, fortemente **mais imprecisa** será a medida correspondente, canonicamente conjugada. Um exemplo claro é a medida da posição de um elétron em torno do núcleo. **Quando se tenta medir com precisão**, você interfere no sistema, fornecendo energia ao elétron, fazendo-o mudar de órbita, **acarretando uma imprecisão** no seu momento. (A1);
- O princípio da incerteza enuncia que se medirmos a posição de vários elétrons idênticos, representados pela função de onda, não obteremos sempre o mesmo resultado. Se o pacote de onda for estreito, **a indeterminação na posição será pequena**; entretanto, as ondas harmônicas possuem muitos números de ondas k . (A2);
- O princípio da incerteza, também conhecido como **o princípio da indeterminação**, formulado por Heisenberg, expressa o fato de não podermos determinar a posição e o momento de uma partícula simultaneamente. Em termos de nossas análises matemáticas, podemos dizer que as funções de distribuição de posição e momento, não podem ser tornados arbitrariamente estreitos ao mesmo tempo. O exemplo clássico desde princípio é **a impossibilidade** de determinar a posição e o momento de um elétron pertencente a um átomo. (A4);
- O princípio da incerteza de Heisenberg diz que **a precisão** máxima que se pode medir entre $(\Delta x \cdot \Delta p)$, será no mínimo igual $(h/2)$, ou seja, isso nos diz **que nunca podemos saber com precisão** o momento e a posição de uma partícula. Analogamente temos para a energia e o tempo **a mesma imprecisão**. (A5).

Pelo contexto das discussões em sala de aula, entre professores e alunos, e analisando suas respostas a esse exercício, tomamos a liberdade de colocar em negrito algumas palavras que terminam por enunciar o princípio de forma desarticulada para o contexto em que as relações de Heisenberg foram trabalhadas. Possivelmente, os alunos recorreram a diversos livros para responder a esse exercício, o que notadamente gerou esses diversos conceitos, ora associados a uma incerteza, ora associados a uma indeterminação. Notadamente essa diferença conceitual foge do escopo da nossa análise

e, do ponto de vista didático ou do ensino, talvez não seja relevante, mas para um contexto interpretativo e filosófico ela é importante.

Ambos os professores usaram como analogia o desenvolvimento das ondas harmônicas, para a compreensão dos alunos em relação ao elétron e suas “incertezas”. Em uma das aulas, o professor (P2) sugere o seguinte exemplo:

- A partir dos gráficos abaixo identifique a partícula (elétron) com maior precisão de localização. Justifique.



Vários comentários foram feitos. Vejamos:

- Como explicar o alargamento da onda por essa equação? (A1);
- O elétron tá mais distribuído no gráfico da direita, é isso? (A2);
- Se a onda se afasta ela fica mais lenta ou vice versa. Conclua... (P2);
- Entendi. Pode ser localizado e definido para um elétron, guiado pela onda? (A1);
- Pode, mas cuidado com a incerteza. (P2);
- Maior precisão no gráfico da esquerda, tá mais concentrado... Talvez..., sei não... (A2).

Sem que os professores se dessem conta, eles trabalharam duas interpretações sobre o Princípio de Heisenberg, nas disciplinas analisadas em nossas observações. Notadamente, do ponto de vista didático, houve pouco ganho conceitual por conta disso, pois como verificamos os alunos terminam definindo o Princípio da Incerteza usando palavras clichês, que lembram descontinuidade ou incerteza entre determinadas grandezas. Apesar de terem deduzido o princípio usando variantes diferentes, eles (professores e alunos) não comentaram sobre as nuances próprias de cada dedução e continuaram apostando no uso das indeterminações, através da função do pacote de ondas, própria também para partículas quânticas, como elétrons, fótons, etc. Uma concepção duvidosa ocorreu com o aluno (A1), que imagina que um “pacote de onda” é um tipo de onda senoidal que conduz o elétron, sendo possível localizá-lo na menor extensão Δx , ao invés de representar ou modelar o seu comportamento físico. Greca et al. (2001) advertem que essa associação do conceito de incerteza para as ondas clássicas possui outro significado no contexto da MQ. Para a MQ, o conceito de Incerteza deve ser estendido a qualquer par de observáveis não simultâneos relativos aos objetos quânticos, como elétrons, fótons, prótons, etc.

Outra coisa que nos chamou a atenção foi que, a maioria dos alunos confunde o conceito de amplitude com o de comprimento de onda de De Broglie. Na identificação da probabilidade de encontrar a partícula quântica sugerida no problema acima, apenas o aluno (A5) observou a amplitude da onda, perguntando se “quanto maior for o pico da onda maior será a probabilidade de encontrar o elétron, certo professor?”. Enquanto isso o aluno (A1) volta a perguntar se o alargamento da onda, talvez se referindo ao comprimento de onda, influencia na probabilidade. “Não, para essa situação o alargamento é irrelevante”, afirma o professor (P2).

Na primeira avaliação da disciplina de Mecânica Quântica, foi sugerido aos alunos que respondessem a seguinte questão, que envolve o Princípio da Incerteza. Vejamos:

- 1) **(1 ponto)** Considere um elétron em um átomo de hidrogênio.⁸⁸ Medimos então a sua órbita com excelente precisão ($\Delta x \ll r_n - r_{n-1}$, - r_n é o raio da n -ésima órbita). Levando em conta o princípio da incerteza, o que podemos dizer sobre o momento do elétron?

Todos os alunos responderam à questão, mas nenhum deles conseguiu a pontuação máxima, errando detalhes na dedução e na justificativa dada ao final. A maioria mostra através dos cálculos, que é possível determinar a incerteza do momento. No entanto, alguns não atentaram ao que o resultado lhe revela, não sendo capaz de argumentar sobre a incerteza imposta ao momento do elétron, a partir da definição da posição. Apenas acrescentam aquilo que ouviram em sala de aula, ou seja, “posição e momento não se determinam simultaneamente” (A1) ou “não se comutam” (A4).

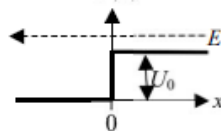
A partir do segundo estágio em diante, para ambas as disciplinas, as aulas, as discussões em sala de aula e as provas realizadas estenderam-se em cima da resolução de problemas de autovalores para a equação de Schrödinger independente do tempo, solução de poço de potencial, poço quadrado finito e infinito, de uma barreira de potencial, do oscilador harmônico, reflexão, transmissão, normalização, probabilidade, etc., como pudemos perceber nas provas em anexo e nas nossas observações.

Embora não tenha sido frequente, em algumas aulas o P2 utilizou slides. Durante uma dessas aulas, sobre o desenvolvimento matemático dos autovalores de alguns potenciais, o professor (P2) solicitou da sua turma, que tentasse responder à questão abaixo, como exercício adicional. A maioria consegue demonstrar o que se pede no problema, ou seja, uma expressão para a transmissão e reflexão de elétrons. Entretanto, depois da sua

resolução matemática, surgiram algumas dúvidas que geraram uma discussão teórica bastante interessante, incentivando os alunos, mostrando-nos que é possível associar os resultados técnicos encontrados, abstratos por natureza, com uma descrição mais detalhada, mais conceitual e fenomenológica, atraindo-os. Vamos à questão:

- Considere um feixe de elétrons viajando através de um fio condutor, da esquerda para a direita e sob a influência de uma d.d.p constante e igual a E . Em $x = 0$, conforme representado no gráfico, o fio torna-se um tipo diferente de metal em que a energia potencial de seus elétrons cresce de zero até U_0 . Se a $E > U_0$, determine o coeficiente de transmissão e reflexão de elétrons.

$$V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ U_0 & x > 0 \end{cases}$$



- Professor, o que significa essas expressões? (A2);
- Significam que alguns elétrons podem ser refletidos e transmitidos. (P2);
- Eles furam o bloqueio como ondas ou como partículas? (A2);
- Como onda, né.(P2);
- Isso porque eles são muito energéticos, ne? (A3);
- Também; mas observe que há reflexão e não só transmissão como esperávamos na mecânica clássica, entendeu?... E..., não é questão de uma variação de energias, tipo a cinética ser maior do que a potencial... Entendeu?...Teremos casos em que ocorre que a energia cinética é menor e haverá transmissão. (P2);
- Lembra-se de ondas em cordas?...É a mesma coisa. Quando um pulso se propaga em uma corda mais fina para uma mais grossa, o que ocorre? Na junção ou no nó, entre as cordas, ocorre que parte do pulso sofre reflexão e outra parte sofre refração, apesar de densidades diferentes. (P2);
- Professor, e se os elétrons viajarem da direita para a esquerda, muda alguma coisa? (A5);
- É a mesma coisa... Temos que entender que os elétrons são ondas de matéria. (P2);

O professor sugere agora que a energia com que os elétrons viajam deve ser $E < U_0$. Ele mostra em slide a resolução das constantes, passo a passo, até chegar ao final e provar que numericamente a reflexão é igual a um ($R=1$).

- O que vocês acham? A reflexão foi total, mas... (P2);
- Aqui em $x > 0$, na segunda região, chamada de classicamente proibida, temos uma probabilidade de encontrarmos o elétron. (P2);
- Por que classicamente proibida? (A2);
- Veja qual foi a condição que eu lhe dei... $E < U_0$, a partícula classicamente não passa; mas quanticamente há indícios de que ela seja encontrada aqui (região dois), rompendo a barreira, com o mesmo comprimento de onda de De Broglie, mantendo a mesma energia, veja o gráfico. (P2);
- Chamaremos isso de tunelamento quanto-mecânico. (P2);
- Observe o gráfico, o que podemos dizer das amplitudes da onda incidente e a transmitida?(P2);
- A amplitude depois do tunelamento diminuiu né?(A5);
- Como? O senhor não disse que a energia era a mesma? (A2);
- E é... Pessoal, a questão aqui é em termos de probabilidade. Vamos determinar. (P2).

A partir dessa conversa, o professor (P2) explicou após o cálculo, a dependência da amplitude com a probabilidade das ondas incidente e transmitida. Além disso, o professor (P2) falou a respeito de alguns dispositivos eletroeletrônicos, onde se possível

vislumbrar muitas aplicações práticas do tunelamento quanto-mecânico, representando um possível ganho conceitual, mostrando nessa aula, a possibilidade de associar os cálculos inerentes ao assunto e sua teoria. De fato, sabemos que os postulados quânticos e a sua sofisticada matemática são diferentes das nossas experiências diárias. Consequentemente, é difícil para que os professores e estudantes descontextualizem conceitos e os apliquem em contextos diferentes daqueles em que foram adquiridos. Quando isso acontece, como no caso acima, ocorre aprendizagem satisfatória.

Em relação ao ensino desses conhecimentos no Ensino Médio, os alunos se posicionaram da seguinte forma:

- Talvez, só os mais teóricos como: quantização de energia, átomo de Bohr, onde de matéria, dualidade efeitos fotoelétrico e Compton. (A1);
- Sim, se fosse para abordar mais o aspecto conceitual, sem matemática, sem puxar demais. (A2);
- A grande maioria dos assuntos não. Precisa da equação de Schrödinger e lá eles não veem isso. Talvez mais o aspecto histórico e conceitual. (A3);
- Acho que alguns assuntos, tipo efeito fotoelétrico, princípio da incerteza; mas sem o formalismo matemático. (A4);
- Acho que com a base conceitual que tenho hoje, eu não conseguiria levar isso para o ensino médio. Justamente por que a base matemática que eu tenho não se encaixa por lá. Talvez um pouco do efeito fotoelétrico, de forma conceitual, possa ser discutido ou compreendido. Existem analogias que podem ser apresentadas com esses assuntos. Onda partícula, o conceito da dualidade de De Broglie, pode ser trabalhado. (A5).

Pelo exposto acima, verifica-se que há um receio da inserção de alguns temas da MQ no Ensino Médio. Há apenas o receio, a dúvida no que ensinar, que conteúdo, etc. Percebe-se uma vontade implícita em suas respostas, associada a uma insegurança conceitual que é natural, tendo em vista que o aspecto matemático inerente a essas disciplinas foram mais acentuados do que os conceituais. Ostermann et al. (2008) asseguram que a pouca discussão do significado conceitual e da interpretação qualitativa do formalismo matemático nos cursos de Física, essencial para o professor de nível médio, associado à falta de relação desse conteúdo com a realidade escolar, induzem o estudante a deixar de lado o que foi abordado nos cursos de Licenciatura e ter como referência o conteúdo dos livros didáticos de nível médio, deficitários e insuficientes.

A exemplo do que foi dito acima, vejamos quais foram suas respostas quando perguntamos o que eles entendiam por estado quântico:

- Olha, eu estudei isso sozinho. Então, pelo que eu entendi, refere-se a todas as características que um sistema pode lhe fornecer. Seja se uma partícula ou de um sistema estudado num instante (t) qualquer. Essas informações eu obtive fora de sala de aula. (A1);
- Se fosse para provar matematicamente... (risos) talvez eu fizesse... (risos). Mas não sei a teoria. (A2);
- Seria..., é..., é o estado que a partícula se encontra no momento de estudo. Estado de energia, localização, momento ou outras características físicas que você tem da partícula, né (A3);

- Sei não. Não tenho condições de saber, infelizmente. (A4);
- Não, sei não. Talvez a gente até tenha visto esse assunto, resolvido problemas sobre ele, mas não tenho uma noção do que seria um estado quântico. (A5).

Com exceção do aluno (A1), que por iniciativa própria estudou a parte teórica de alguns assuntos, e do aluno (A3), a maioria não soube responder, apresentando uma insegurança já prevista nas respostas anteriores. Embora esses alunos tenham tido contato com esse e outros assuntos, em duas disciplinas, durante um ano, parece não ter sido suficiente para que eles se apropriassem dos seus aspectos conceituais.

5.2.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS – UEPB

Nos primeiros dias de aula, os professores expuseram os objetivos das suas disciplinas, apontando para discussões conceituais, contextualizadas e formais. No entanto, ao longo de suas aulas, o que observamos foi uma contemplação muito mais intensa para os aspectos instrumentais da MQ, associada a uma capacidade de resolução de problemas que, nos comentários dos licenciandos observados, não foram suficientes para que eles adquirissem uma familiaridade com os conceitos inerentes àquela teoria. As ausências desses aspectos conceituais e fenomenológicos em sua formação, possivelmente, não os prepararam para o ensino desses fundamentos no Ensino Médio. Apesar de se mostrarem a favor dessa inserção, não se sentem capazes de trabalhar alguns desses conteúdos essencialmente quânticos, a não ser alguns outros, cuja abordagem ainda se faz via Física Clássica.

O fato de a todo instante, professores e alunos relacionarem aspectos ou fenômenos quânticos com os clássicos, termina gerando uma estranha sensação, em querer transformar em imagens concretas os fenômenos quânticos abordados, assim como fazemos no mundo clássico. Nesse sentido, na maioria das discussões realizadas, como por exemplo, quando se falou em conjecturar partícula como onda ou onda como partícula, descrever uma função de onda, entender os potenciais quânticos, etc, percebemos uma forte inclinação dos professores à busca de algo que pudesse concretizar o que estavam dizendo. Isso foi possível realizar nos momentos iniciais de cada disciplina, em relação aos experimentos virtuais dos efeitos, fotoelétrico e Compton, e na experiência da dupla fenda com fótons. No entanto, quanto mais se aprofundavam nos assuntos estritamente quânticos, por exemplo nas “barreiras” de potenciais, essas “visualizações” ficaram mais dramáticas e suas tentativas, tornaram-se tendenciosamente baseadas em analogias com a Física Clássica.

Para o contexto explicativo do experimento virtual (Dr. Quantum) realizada em classe parece não ter deixado claro o objetivo a que (P1) se propunha, que é o estudo da natureza dualista da matéria e da radiação, o princípio da superposição linear de ondas de probabilidades e o princípio da incerteza. Ao observar e analisar os comentários ali descritos, concluímos que nenhum nos leva a esses objetivos. A compreensão dos alunos para a formação de um padrão de interferência devido a um fóton emitido continuamente pela fonte foi possível quando eles foram solicitados, inicialmente, a “aceitar a natureza do fóton” ao interferir consigo mesmo nas fendas. Posteriormente, esses alunos passaram também a acreditar na dualidade onda-partícula e na exclusão simultaneamente de suas existências, como ficou demonstrado nos diálogos realizados. Assim, diante das “evidências reais do experimento” realizado, os alunos passaram a “compreender” esse estranho comportamento, sob a égide de dois argumentos que caminham em sentidos opostos. Infelizmente, as indagações feitas pelo aluno (A1), referentes a esses pressupostos e seu uso impróprio para uma mesma situação, ocorreu depois da aula e não despertou interesse nos outros colegas.

Geralmente, a maioria dos alunos quando chega às disciplinas relativas aos fundamentos quânticos, já estudou o princípio da superposição ondas clássicas. No entanto, como nos assegura Singh (2004), dentro do contexto quântico, o seu entendimento torna-se crucial para a compreensão das características de ondas de partículas, em especial para entender como os pacotes de ondas são formados. Nas entrevistas, constatamos que mesmo aqueles estudantes de MQ que sabem explicar o princípio da superposição, a partir de contextos clássicos, têm dificuldade em discernir a sua relevância para as partículas quânticas. Muitos acreditam que, para um dado potencial, os estados estacionários são as únicas funções de onda possíveis. Eles têm dificuldade para entender que qualquer função de onda suave que reúne a condição de contorno é aceitável, e pacotes de ondas são formados pela superposição linear de estados estacionários.

Outro assunto bastante discutido ocorreu em torno do Princípio da Incerteza. Notadamente, foram realizadas duas deduções matemáticas diferentes para o mesmo princípio, que evidentemente, levaram aos mesmos resultados, no qual tivemos sempre o quantum de ação (h) não nulo, como divisor de água, gerando a impossibilidade de medidas simultâneas em dois operadores quânticos incompatíveis. As explicações conceituais dadas ao Princípio de Heisenberg fluíram de forma a dar uma mesma

implicação, ou seja, tudo deveria girar em torno de uma “dificuldade de medição”, de “imprecisão”, de “parâmetros que não se comutam” ou que esses parâmetros não podem ser medidos simultaneamente, sob pena de se “perder informações” prévias disponível no outro. Ao observarmos as respostas dos alunos, no exercício e na prova, ficou notório o uso repetido de algumas dessas frases, além de um bom desenvolvimento matemático para o cálculo na incerteza do momento do elétron, pedido na prova. Portanto, a maioria ateve-se especificamente à consequência desses conceitos, apresentados como princípios (princípio da incerteza, dualidade onda-partícula e outros), sem uma conexão com os postulados que lhes dão origem.

Como já dissemos, o restante do curso aconteceu quase sempre neste nível de resolução de problemas, sem muita diferença daquilo que já estamos acostumados a ver nas disciplinas que acompanhamos ao longo das nossas observações. Os alunos foram capazes de calcular a densidade de probabilidade na questão três da primeira avaliação da disciplina de MQ (anexo 7). Entretanto, o seu significado ficou apenas na ocorrência do evento, como o resultado daquilo que esperamos que ocorra ou que deverá ocorrer, como se postula na mecânica clássica. No experimento da dupla fenda, quando o professor (P1) perguntou por onde o fóton estava passando, esperávamos que ele despertasse para além de uma ferramenta matemática na descrição de uma medida no mundo microscópico, mas que também valorizasse a característica intrínseca daquela situação, que objetiva nossa ignorância em saber por onde o objeto quântico passou, ou seja, que o fóton não carrega informação sobre onde deve incidir ou por onde passar.

A partir da experiência com outros alunos observados (UFBA), percebemos em conversas informais, após cada entrevista gravada, sérias dificuldades conceituais, que não ficaram só em não saber definir o que é um estado quântico. A situação se complicou quando perguntamos¹⁷ sobre outros conceitos, outros postulados que são considerados pontos de partida para um entendimento mais acentuado da MQ. Em relação à UEPB, perguntamos aos alunos A1 e A5 quais eram as suas compreensões a respeito do significado da equação de Schrödinger e sua importância para a MQ, já que foi durante o curso, a palavra mais usada por eles.

¹⁷ Diante desse fato, na UEPB, resolvemos, após as entrevistas, e fora do seu script, continuar a conversa gravada com alguns dos alunos participantes da pesquisa.

Percebemos nas respostas dadas por esses alunos, uma possível insegurança e uma falta de coordenação em suas falas, ficando claro, para nós, que essa equação, considerada fundamental para a MQ, não foi trabalhada de forma conceitual, como pudemos constatar, apesar de várias vezes a utilizarem para resolução de problemas. Não houve, por assim dizer, um entendimento entre as relações matemáticas e a descrição física daqueles parâmetros, ou seja, uma compreensão do que se estava fazendo e seu porquê. A esse respeito, Singh (2008-a) destaca que, dentre as dificuldades encontradas em sua pesquisa, a que se refere à equação de Schrödinger independente do tempo é a mais importante da MQ, no sentido de que outras dificuldades, como a evolução temporal dos estados quânticos, conceito de medida e de valores médios, determinação de possíveis funções de onda para um sistema quântico, deverão aparecer. A equação de Schrödinger dependente do tempo é mencionada, de passagem, na maioria dos textos de Física Moderna e a ideia de uma superposição linear de funções de ondas é usualmente ignorada.

De fato, durante a pergunta o aluno (A5) rabiscou numa folha, descrevendo a equação, como se buscasse nela esse detalhe que não lhe foi familiar durante o curso. “tão fácil de usar... mas não consigo ver o seu conceito... (risos), infelizmente”. Ele argumenta que vai tentar o mestrado em Meteorologia e “lá não terei que conceituar... (risos)”.

Durante o acompanhamento das disciplinas aqui citadas, o conceito de pacote de ondas foi introduzido de maneira *ad hoc*, ao discutir os modelos semiclássicos da dualidade onda-partícula, exceto no contexto do tunelamento através de barreiras, no qual pouca justificativa ou raciocínio foi dado. Assim, como a equação de Schrödinger é a base da MQ, ela termina por ser severamente desestimulada dentro do seu próprio contexto.

O outro aluno (A1), falou da sua dificuldade durante o curso, procurou estudar à parte, e se mostrou feliz por ter tido a oportunidade de ter estudado com o professor (P2), mas que na parte teórica o mérito era dele, pois “procurei trabalhar os cálculos usando o livro adotado, Gasiorowicz (1979), e a parte teórica, usando o livro fundamentos da Mecânica Quântica de Osvaldo Pessoa Jr. (2003). Para mim ficou muito claro falar e usar essa equação e de outros conceitos, como a dualidade para partículas quânticas. Ele acredita que: “a equação de Schrödinger descreve uma evolução temporária do operador energia, toda informação que desejo saber está contido na função de onda, né”. Quanto à dualidade, “acho que ela é o fundamento de toda a MQ”. Esse foi o aluno que afirmou

ter estudado sozinho, que se apresentou disposto a ensinar conteúdos conceituais de MQ no Ensino Médio e que pretende se preparar para o mestrado na área de Ensino de Física, como nos revelou ao final da conversa informal.

Por outro lado, em relação aos professores também é sentida a dificuldade dos alunos, conforme constatamos, quando o professor (P1) fez o seguinte relato fora do script das entrevistas e em conversa informal e gravada:

- Faz dois anos que leciono esta disciplina e acredite que, se você deixar um leque e começar a discutir, você chegará num momento que não conseguirá mais responder as perguntas, porque são muitas interrogações que ficam. Então, eu uso a metodologia autoexplicativa, seminários, estudo dirigido, mas a gente vê como eles ficam perdidos em determinados conceitos. Você deve ter percebido quando tratamos sobre o conceito de fótons. O conceito não é tão simples assim de se definir. Como pode ser partícula sem massa?
Claro, à medida que vamos caminhando com a disciplina, eles vão vendo como ela é importante e necessário esse conceito de fóton, na experiência do efeito fotoelétrico, ondas eletromagnéticas; é comparável ao conceito de força. O professor não define o conceito de força, mas à medida que ele vai caminhando e usando o conceito, ele não sente mais a necessidade de uma definição. Os alunos aceitam. É um conceito a priori.

O professor (P1) demonstra que não é possível fazer definição nem se dar conceitos de fenômenos. E como o assunto é difícil, ele também se sente com dificuldade para explicá-lo; com isso parece que podemos inferir que não é possível ensinar sistematicamente, então espera-se que os alunos percebam o conceito por intuição e indução; impossível de ser por dedução.

Quando o professor (P2) reiteradas vezes dizia: “O importante é dominar uma estratégia para resolução de diversas formas de problemas quânticos”, ou “... não vale conceituar o que é abstrato... é loucura... não tentem isso!... a demonstração realizada deve falar por si mesmo... ela me diz tudo que eu preciso”, ele parece defender que resolver listas intermináveis de questões parecidas e repetitivas, era o caminho para entender os conceitos e postulados envolvidos nas diversas situações-problema, com os quais os alunos se depararam. No entanto, sabemos que essa prática apenas favorece a memorização, transformando-se numa atividade mecânica ou repetitiva, sem nenhum trato com os aspectos conceituais. Possivelmente, essa metodologia usada por esse professor seja fruto da sua própria formação e serve como uma justificativa para o uso excessivo do formalismo matemático, desenvolvido na sua disciplina.

Entendemos ser necessário que um licenciando internalize toda essa mecanização que acompanhou as disciplinas aqui analisadas, uma vez que ele precisa ter um conhecimento básico dessa ferramenta. No entanto, a abordagem conceitual e

fenomenológica da MQ, que deveria subsidiar esses licenciandos em uma disciplina específica a essa formação, tendo em vista que eles irão ensinar no Ensino Médio, foi mantida na mesma tradição das disciplinas de um Bacharelado em Física, no qual se caracteriza um ensino mais técnico, mais formal, tradicional, buscando a todo tempo analogias com a Física Clássica. Assim, o entusiasmo por tais assuntos parece fadado a esmorecer no ambiente em que deveria ser estimulado, ou seja, nos cursos de formação.

Não se concebem as disciplinas voltadas à MQ, para licenciandos, ficarem às escondidas ou atrás de um aparato matemático muito forte, que termina por inibir o seu aprendizado, afugentando os alunos de pelo menos tentar entender os princípios que lhes dão sustentação. Acreditamos que tornar o mundo quântico mais conceitual para o licenciando deve ser o principal objetivo dos cursos de formação, uma vez que ele só quer ser capaz, conceitual e pedagogicamente, de incorporar em suas aulas no Ensino Médio, alguns tópicos da MQ.

6. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS DOCUMENTOS OFICIAIS

Can nature possibly be as absurd as it seemed to us
in these atomic experiments?¹⁸

W. Heisenberg (1901 – 1976)

Neste capítulo, apresentamos uma análise descritiva dos documentos oficiais (ementas, provas do ENADE, PPP e diretrizes curriculares), que compõem a estrutura curricular dos cursos de Licenciatura em Física da UFBA e UEPB, de modo a identificar elementos e formas de articulação entre esses elementos, que permitam uma comparação com o que já foi analisado no capítulo anterior, no sentido de verificar se estão em consonância ou não com o tipo de formação preconizado pelos documentos oficiais e sua adequação aos fundamentos da Mecânica Quântica.

6.1 O CASO DA UFBA

O curso de Licenciatura em Física do Instituto de Física da UFBA, noturno, foi criado em 1999, possui uma carga horária de 3.124 horas, das quais 2.125 horas são obrigatórias, 323 horas optativas, 200 horas para atividades de formação complementar e 476 horas para estágios supervisionados, com duração mínima de 4 anos e máxima de 7 anos. Em sua página na internet encontramos detalhes que indicam o perfil do curso, disciplinas oferecidas, clientela e corpo docente. Os seus objetivos estão fundamentados em “formar profissionais que atuarão na área de ensino de física, em escolas de segundo grau, podendo ainda optar por seguir uma carreira acadêmica nas universidades”¹⁹.

Não encontramos na secretaria do curso o seu Projeto Político Pedagógico (PPP), o que nos dispensa de comentá-lo. No entanto, é possível perceber, a partir do seu fluxograma (anexo 1), que a estrutura curricular do curso foi elaborada tendo como base três eixos articuladores, a saber:

- Formação de Conhecimentos Básicos da Física e Ciências afins e seus instrumentais matemáticos;

¹⁸ Pode a natureza ser tão absurda como estes experimentos atômicos parecem indicar?

¹⁹ <http://www.fis.ufba.br/graduacao.htm>

- Formação dos conhecimentos didático-pedagógicos;
- Formação em Ciências, Tecnologia, Sociedade, Ambiente (CTSA) e Desenvolvimento Humano.

O primeiro eixo refere-se às disciplinas que concentram seus estudos em conteúdos de Física Clássica (12 disciplinas) e na introdução à Física do século XX (estrutura da matéria I). Ambas são de caráter teórico e experimental. As outras disciplinas, de cunho matemático (4 disciplinas), oferecem as ferramentas necessárias ao desenvolvimento e ao aprimoramento do raciocínio na solução de problemas de Física. As disciplinas de caráter didático-pedagógico, a exemplo das disciplinas projetos e modelos, didática, metodologias e práticas de ensino (I e II) e psicologia da educação, integram a formação dos licenciandos, devendo valorizar as experiências e a vivência dos alunos, buscadas no conhecimento escolar. O terceiro eixo visa à formação do licenciando em função de ações educacionais, fundamentadas em um planejamento sistemático, que leve em conta a discussão de implicações da relação CTSA e desenvolvimento humano (Física e sociedade, física do meio ambiente), possíveis de serem discutidas e inseridas no ensino básico.

A disciplina que acompanhamos como observador não participante, no segundo período de 2009, foi Estrutura da Matéria I, oferecida à turma de Licenciatura em Física, curso noturno, no Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia. Essa é a única disciplina oferecida aos licenciandos do oitavo período, que trata de alguns conceitos quânticos em suas últimas unidades, conforme a sua ementa (anexo 3). Ela é ministrada em 120 horas-aula, distribuída em parte teórica e prática. É importante acrescentar que o licenciando na UFBA deve cumprir, segundo o programa do curso, 24 disciplinas obrigatórias e 6 optativas. Dessas obrigatórias, 12 disciplinas tratam de Física Clássica e apenas a disciplina de Estrutura da Matéria I contempla, em parte, conhecimentos de MQ, ou seja, ela é apresentada aos licenciandos de forma sistemática e deve tratar dos conhecimentos pertinentes à física do século XX. Entretanto, nas optativas, o aluno pode escolher outras disciplinas, a exemplo de Estrutura da Matéria II, Tópicos de Física Moderna, Mecânica Quântica I e II, Evolução da Física, como complemento. Algumas dessas disciplinas fazem parte do bloco do curso de Bacharelado em Física, sendo permitido aos alunos cursarem, até o quinto período, disciplinas de ambos os cursos, ou seja, os alunos da Licenciatura podem cursar disciplinas pertencentes ao

bloco do Bacharelado ou vice versa. Essa permuta entre os cursos é mais recorrente no turno da manhã.

Com relação a essa permuta, o professor em conversa informal, nos alertou para uma discrepância existente entre o bacharelado e o licenciando, mostrando-nos que o último deverá ser um profissional que trabalhará conteúdos que não requerem uma sofisticação do formalismo matemático, ou ainda, que não necessitará de uma abordagem mais completa da MQ. Nesse sentido, ele sinaliza em favor de uma simplificação dessa disciplina, sem deixar pistas do que deve ser retirado ou acrescentado. No entanto, durante suas aulas, ficou notória a sua inclinação para a dualidade onda-partícula, afirmando, inclusive, que ficaria satisfeito se “o aluno soubesse explicar o experimento da dupla fenda com partículas”.

De acordo com o fluxograma, a disciplina de Física geral e experimental IV é o primeiro contato dos licenciandos para um estudo qualitativo da produção da radiação e a natureza quântica da matéria, no entanto, por questões de tempo, carga horária ou mesmo pelo enfoque dado ao curso, segundo PS1, alguns professores preferem muitas vezes transferir a discussão sobre esses assuntos para a disciplina de Estrutura da Matéria I. Segundo a ementa, a disciplina Estrutura da Matéria I:

“Visa introduzir o aluno aos fenômenos microscópicos que possibilitem compreender e aceitar a formulação atômica da matéria e a natureza estatística dos efeitos microscópicos observados. Uma série de dados experimentais apresentados e outros obtidos no laboratório pelo próprio estudante são analisados à luz da hipótese atômica. As bases fenomenológicas da teoria quântica são então introduzidas e alguns problemas são constantes da lista inicial analisada”.

E a disciplina tem o seguinte objetivo:

“Ao término deste curso o aluno deverá conhecer a chamada “Velha Mecânica Quântica”, isto é, algumas das teorias e experimentos que precedem a atual Mecânica Quântica. Deverá também conhecer a equação de Schrödinger e fazer algumas aplicações”.

Percebe-se ainda, na ementa da disciplina Estrutura da Matéria I, que o seu objetivo é descrever a matéria com um forte apelo à chamada “velha Mecânica Quântica” (Estudo da radiação do corpo negro, os trabalhos de Planck e Einstein, modelos atômicos

clássicos de Thomson, Rutherford e semi-clássico de Bohr, os trabalhos de Compton e De Broglie), sinalizando para resolução de problemas ou “aplicações” de problemas que normalmente compõem a velha MQ, terminando com exemplos de aplicação da equação de Schrödinger. Os conteúdos relativos à teoria cinética dos gases, estrutura atômica e seus modelos, que foram fortemente contemplados na disciplina EM I, têm sua importância dentro de uma visão clássica, e fazem parte do contexto dessa disciplina, como sempre enfatizava o professor em suas aulas, denotando que o objetivo daquela disciplina era a “Estrutura da Matéria”.

Entendemos que esses assuntos relativos à física clássica, envolvidos em grande parte na disciplina Estrutura da Matéria, são essenciais à formação de qualquer físico ou licenciando, pois realiza bem o seu papel em difundir a estrutura atômica da matéria. No entanto, pesquisas têm nos revelado que apenas associar conteúdos clássicos a conteúdos essencialmente quânticos não tem produzido bons resultados (Ireson, G., 2000; Fischler e Lichtfeldt, 1992), ou seja, segundo esses pesquisadores, assuntos que envolvem explicações clássicas ou semiclássicas não são necessários para a compreensão dos fundamentos da MQ, mostrando-se, portanto, incompatíveis.

6.2 O CASO DA UEPB

O curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB teve sua criação a partir da resolução N°. 21/66-CEE/PB, datada de 21 de dezembro de 1966, sendo reconhecido em 26 de dezembro de 1978 sob a lei: P - 7201/DF N° 82940/78. O curso funciona nos períodos diurno e noturno, possui uma carga horária de 3.600 horas, em regime acadêmico seriado/semestral, com duração mínima, para o curso diurno, de 4 anos ou 8 semestres e máxima de 6 anos ou 12 semestres e, para o curso noturno, a mínima é de 4,5 anos ou 9 semestres e a máxima de 6,5 anos ou 13 semestres.

Em seu Projeto Político Pedagógico (PPP) encontramos detalhes que indicam o perfil do curso, disciplinas oferecidas, clientela e corpo docente. Em destaque, o seu objetivo geral está de acordo com o que preconizam as Diretrizes Curriculares Nacionais, pois visa preparar profissionais que se “dediquem à formação e à disseminação do saber científico nas diferentes instâncias sociais”, através das diversas formas de atuação, contemplando o ensino médio e fundamental, escolas técnicas e universidades, permitindo uma educação científica contemporânea, de forma a proporcionar ao

estudante condições de dar prosseguimento a sua formação. Além do objetivo geral, o PPP apresenta como objetivos específicos os seguintes:

- Abordar e tratar problemas novos e tradicionais, apoiado em conhecimentos sólidos de Física;
- Organizar as atividades instrucionais e planejar os conteúdos de um curso de Física;
- Localizar e dar significados às dificuldades conceituais e operacionais de seus alunos;
- Refletir sobre sua prática docente, procurando explicar e relacionar as razões de seu comportamento e do desempenho dos seus alunos, identificar sua postura, além da capacidade de diálogo nas diferentes instâncias de atuação;
- Programar, sustentar e renovar suas atualizações didática, cultural e científica.

Para atingir esses objetivos pretendidos, segundo o PPP, o currículo pleno ou o fluxograma do curso (anexo 4) está composto de um núcleo comum (incluindo atividades básicas, 50%, e complementares, 10%) e de um núcleo específico (incluindo atividades relativas à formação pedagógica e atividades eletivas, 40%). Nas atividades de formação pedagógicas estão inseridos os estágios supervisionados, cada um com a carga horária de 120 horas, totalizando 480 horas de estágios supervisionados.

Em relação ao perfil das disciplinas (Física Moderna e Mecânica Quântica) que analisamos, o PPP sinaliza que elas devem ter um caráter significativo na articulação entre a teoria e a prática, e que contemplem as competências e habilidades descritas nas Diretrizes Curriculares para os cursos de Licenciatura em Física, voltadas à formação do físico-educador e, ao mesmo tempo, flexibilizem a inserção desses formandos em um mercado de trabalho diversificado. A partir desse referencial, as ementas das disciplinas, acompanhadas durante os dois períodos de observação não participante, possuem os seguintes Portfólios:

- **FÍSICA MODERNA:**

Possui uma carga horária de 132 horas anual e é oferecida nos dois turnos. A sua ementa está assim distribuída:

- Radiação e a origem da Teoria Quântica. A Quantização da Eletricidade, da Luz e da Energia. A Descoberta do Núcleo Atômico. O Átomo de Bohr. Propriedades Corpusculares da Radiação. Dualidade Onda-Partícula. Postulados de De Broglie. A versão de Schrödinger da Mecânica Quântica. Soluções da Equação de Schrödinger: partícula livre, poços de potenciais e o oscilador harmônico simples. Teoria da relatividade Especial. O Átomo de Hidrogênio. Física Nuclear: Modelos nucleares, decaimento nuclear e reações nucleares. Partículas Elementares.

Seus objetivos são:

- Apresentar de forma propedêutica, os conhecimentos sobre Teoria da Relatividade e Teoria Quântica e como esses conhecimentos, elementos constituintes da Física Moderna, impulsionaram o

conhecimento acerca da Ciência e da Tecnologia do século XX e modificaram a vida do homem moderno.

- Apresentar o corpo fenomenológico e matemático para solucionar e prever vários problemas do ponto de vista da Física Moderna.

Além desses, a disciplina apresenta alguns objetivos específicos, a saber:

- Capacitar o aluno para abstrair, do ponto de vista físico e matemático, as novas concepções que este conhecimento comporta frente aos conhecimentos de Física Clássica, amplamente discutido.
- Discutir formas metodológicas para a introdução do conhecimento de Física Moderna no Ensino Médio.
- Criar uma nova visão para interpretação dos diversos fenômenos da natureza.
- Capacitar matematicamente, o aluno, para solucionar problemas físicos nas áreas de Física Relativística, Física Quântica e Física de Partículas.
- Mostrar as falhas apresentadas pela Física Clássica e o necessário surgimento da Física Moderna.

- **MECÂNICA QUÂNTICA:**

Possui uma carga horária de 66 h/aulas, distribuídas ao longo de um semestre, oferecida nos dois turnos. Sua ementa está assim constituída:

- Equações de Onda de Schrödinger: Autofunções e Autovalores; Potenciais Unidimensionais; A Estrutura Geral da Mecânica Quântica; Métodos de Operadores em Mecânica Quântica; Equação de Schrödinger em Três Dimensões; Momento Angular; A Equação Radial; O Átomo de Hidrogênio.

Seus objetivos são:

- Pretende-se que ao final do curso, que o aluno seja capaz de escrever a equação de Schrödinger dependente e independente do tempo para o problema de poço quadrado infinito e discutir como aparece a quantização de energia. Seja capaz de discutir o significado dos termos: número quântico, estado fundamental, estado estacionário, valor esperado, elemento de matriz, regra de seleção de degenerescência e princípio de exclusão. Também seja capaz de discutir as similares e diferenças entre o modelo de Bohr e o tratamento da equação de Schrödinger para o átomo de hidrogênio.

Sobre a metodologia utilizada para alcançar esses objetivos e o processo de ensino-aprendizagem, as ementas sugerem que:

- O processo de ensino-aprendizagem dar-se-á utilizando-se de expressão oral sobre os assuntos do programa, abordagens teóricas, demonstrativas, com distribuição de listas de exercícios e resolução de exercícios em sala de aula.

Assim, percebe-se que todo o planejamento do PPP, bem como das ementas e objetivos das disciplinas, estão em consonância com as exigências das Diretrizes Curriculares, além de ter um alinhamento acentuado com os PCN. No entanto, esse discurso educacional fica bem preconizado no papel, pois o que observamos em sala de aula foi uma metodologia voltada para o ensino tradicional, com uma lista de conteúdos que privilegia muito mais os aspectos técnicos, descontextualizados e com raras aplicações voltadas para o ensino básico. Quando perguntamos aos professores se eles modificariam alguma coisa na ementa de suas disciplinas, tendo em vista que o PPP do

curso sinaliza para uma maior abertura nas atividades instrucionais, para um planejamento de conteúdos mais adaptado à realidade dos alunos, eles responderam:

- Bem, se fosse..., poderia haver modificações; mas como eu falei, eu prego a objetividade. É..., eu acho que a disciplina tá com um conteúdo fechado, bacana. Porque ela não visa somente a estrutura da matéria, mas também um pouco de relatividade, física das partículas, física atômica e molecular. Porque eles (os alunos) terão um suporte pra entenderem e vê essas aplicações, em termo de quantização, dentro da física. É essencial o entendimento disso tudo para a compreensão desses novos conceitos. (P1);
- Não. Eu não modificaria. Talvez um pouco de história. A gente não tem livros sobre isso. Não tem fonte. Acho que o reforço histórico seria de bom proveito. Recurso tecnológico não dá pra associar, por que os conceitos que eles veem são poucos pra tal. (P2).

Como pudemos perceber, através de suas falas e durante as nossas observações, os professores não se mostraram abertos para novas competências ou até mesmo novas atitudes, que pudessem transformar suas práticas em ações capazes de despertar naqueles futuros professores o prazer de aprender e o sentido de ensinar. Dessa forma, eles vão de encontro ao PPP do curso, quando adverte que:

- A consciência do profissional em educação que se quer formar não depende apenas de novos conteúdos-disciplinas, mas essencialmente da maneira como se estabelece a relação teoria-prática, levando-se em conta a contextualização do ensino, como também, o compromisso social e ético-profissional que o professor universitário deve oferecer ao aluno, para torná-lo educador capaz de ensinar Física relacionando-a com a vida.

Pelo contrário, os professores preferiram enfatizar fortemente os aspectos mais formais de suas disciplinas, sem uma devida relevância, aplicabilidade ou funcionalidade de seus conteúdos na vida social desses formandos.

A partir desse contexto, perguntados sobre o que eles acham que os alunos entendem ou aprendem nessas disciplinas, os professores foram enfáticos em afirmar que:

- O que eu tento fazê-los entender é essa maneira de sair do contínuo para o discreto. É a palavra-chave que já falei: a quantização. A gente começa por quantização da energia, mas ele já teve um domínio anterior, adquirido pela quantização da carga. A partir daí a gente começa a dizer: olha a matéria e a energia não se comporta como agente pensava antes, ela tem um comportamento particular, que é ser quantizado. Então, é isso que eu tento pregar para que eles possam compreender os conceitos de Física Moderna. (P1);
- Essa pergunta é um pouco difícil de responder. Eu vou tirar por mim. Quando terminei o curso de MQ, eu sabia muito pouco. Só que na verdade, tudo é diferente, né? Os conceitos são diferentes, as ideias. O que eu acho pior da MQ, não é a matemática, mas a filosofia da disciplina. As interpretações, os conceitos que surgem diferentes daqueles que nos já sabemos, do tipo – condições de contorno – não são mais condições iniciais; função de onda, probabilidade, etc. Tudo isso é muito confuso. Portanto, o que eu espero que eles aprendam é o básico, ou seja, que agora o estado é representado por uma função de onda, a equação que descreve a evolução temporal é a equação de Schrödinger, que faz o mesmo papel da segunda lei de Newton, e que saibam aplicar alguns problemas propostos nos livros textos, como oscilador harmônico, potenciais, poços, até a solução para o átomo de hidrogênio. Se ele conseguir entender a solução dada pela MQ para o átomo de hidrogênio, diferente da de Bohr, eu acho que já é muita coisa. Embora entenda que, só depois de muita leitura é que ele vai apurar essa compreensão. O conceito matemático envolvido não é tão complicado, mas a filosofia, a ideia, o conceito, esses sim é que são abstratos. Se ele sair com 70% do que a gente ministra, já é grande coisa. (P2).

A partir dos relatos acima, para esses professores, a base conceitual da MQ não faz parte do programa de suas disciplinas, pois como eles mesmos disseram, “são abstratos”. Em assim sendo, a maior habilidade que se conseguiu com os alunos nessas disciplinas foi a capacidade de calcular um resultado ou prever um resultado experimental, sem que fosse necessário um entendimento subjacente de sua base conceitual. Nesse sentido, P1e P2 mantiveram-se coerentes desde o início de suas aulas. No entanto, o simples fato de levá-los à memorização de soluções para problemas específicos não se consolida como o objetivo ou a razão central do ensino dessas disciplinas para licenciandos, tendo em vista que o PPP do próprio curso argumenta em favor de uma maior aproximação da base conceitual, mais próxima da realidade de seus alunos.

6.3 DIRETRIZES CURRICULARES NACIONAIS

Com base no que está explícito nas Diretrizes Curriculares Nacionais para os cursos de Física:

“O físico, seja qual for sua área de atuação, deve ser um profissional que, apoiado em conhecimentos sólidos e atualizado em Física, deve ser capaz de abordar e tratar problemas novos e tradicionais e deve estar sempre preocupado em buscar novas formas do saber e do fazer científico ou tecnológico. Em todas suas atividades, a atitude de investigação deve estar sempre presente, embora associada a diferentes formas e objetivos de trabalho” (BRASIL, 2002, p.3).

Para o nosso estudo, interessa-nos distinguir, a partir desse objetivo geral o perfil para a formação de Físico-educador. Vejamos:

“Físico-educador: dedica-se preferencialmente à formação e à disseminação do saber científico em diferentes instâncias sociais, seja através da atuação no ensino escolar formal, seja através de novas formas de educação científica, como vídeos, “software”, ou outros meios de comunicação. Não se aterá ao perfil da atual Licenciatura em Física, que está orientada para o ensino médio formal” (BRASIL, 2002, p.3).

Assim definida nas Diretrizes Curriculares Nacionais, a perspectiva profissional desejada para o Físico-educador deve ser a de dominar princípios gerais e fundamentos das Físicas, clássica e moderna, estando familiarizado com suas áreas e suas metodologias de ensino aprendizagem. Nessa perspectiva, entendemos que esse é o tipo de profissional que queremos formar e que será o responsável por romper com o modo

como a Física vem sendo ensinada na Educação Básica. Para tal, é preciso enriquecer os planos curriculares nos cursos de formação de professores de Física, buscando novas reflexões e possibilidades acerca de recursos didáticos e metodológicos, que garantam essas mudanças.

No entanto, a maneira como foram apresentadas e discutidas as disciplinas que têm como objetivo a inserção da teoria quântica nas Licenciaturas, como observamos ao longo dos semestres, privilegiando a memorização de fórmulas matemáticas prontas para a resolução de exercícios, a memorização de conteúdos conceituais semiclássicos, em detrimento, por exemplo, do entendimento das bases conceituais envolvidas nos fenômenos quânticos estudados e da relação dos fundamentos essenciais à compreensão dessa teoria, não deverá produzir uma formação adequada, em MQ, no sentido de que esses futuros professores não adquiriram competências e habilidades suficientes para inserir, num futuro bem próximo, alguns tópicos de MQ no Ensino Médio.

Percebemos isso durante nossas observações e nas entrevistas, quando o professor (PS1), por exemplo, afirmou que ficava angustiado com o destino dos alunos e suas aprendizagens. Reiteramos essa “preocupação” quando entrevistamos os seus alunos, perguntando-lhes se eram capazes de abordar conteúdos de física moderna, relacionados com a MQ, no Ensino Médio (EM). Vejamos suas respostas:

- Rapaz, no Ensino Médio (EM) precisa de um trabalho mais sério de reestruturação, no sentido de que o ensino da Mecânica Newtoniana já é confuso, quanto mais a MQ. Não é um problema da física, né?...É a própria capacidade de compreensão do alunado que é limitada. Não sei se é a estrutura educacional ou... Uma parte é preguiça da pessoa em pensar;... Ai vem a redução de conteúdos, as pessoas ainda associam a física as contas e eu acho que é preciso quebrar esse conceito, pra você acrescentar alguma coisa é preciso primeiro quebrar esse conceito. Dessa física matemática, da física que só resolve questões com a matemática sem saber o que tá calculando. Essa questão da física moderna e quântica é preciso parar antes, não é uma coisa que se vai conseguir com facilidade... Para o EM deve chegar a ser quase filosófico, né... Então não seria trivial... Não é impossível fazer essa abordagem no Ensino médio. (A1S);
- Bom, vamos por parte. Levar pra quem? Acho que o estudante do EM hoje tá em decadência, com raras exceções, tendo a mínima capacidade de assimilar esses conceitos de MQ. Segundo, eu acho e verifico assim, que existe um desinteresse quase generalizado por ciência. Temos hoje uma educação voltada pra o mercado tecnicista. Então, não vejo muita perspectiva de levar esse tipo de conhecimento para o EM, principalmente em termos de educação que temos hoje. (A2S);
- Alguns, bem que poderiam. Por exemplo, o efeito fotoelétrico, o átomo de Bohr, tem outros assuntos interessantes, assim como a teoria da relatividade sem a abordagem matemática mais forte, mais explorando o lado conceitual, mais do cotidiano, até porque nós professores ainda não temos capacidade de abordar isso, vimos muito pouco esse assunto em nível de graduação e o que vimos, pelo amor de Deus, foi só conta. (A3S);
- Sim. Porque na verdade a preparação de aulas envolve estudos prévios do professor, né? Apesar de não se ter uma boa formação, aliás, em nenhum lugar do mundo se tem, nós temos que preparar uma boa aula. Então, sim, eu poderia ministrar aulas das noções iniciais de MQ para o EM. (A4S);

- Isso é uma coisa muito discutida na universidade; eu acho que seria importante. Mas precisa se ver como fazer isso, pois com já falei antes, a MQ é muito abstrata e complexa, se para o aluno da universidade já é difícil, imagine o aluno do EM. (A5S);
- Olha, eu já vi vários projetos nesse sentido. Mas mesmo assim, abordar a MQ no EM, ela já entra numa linguagem, aqui na universidade marginalizada, no sentido de fazer muita comparação com a mecânica clássica, que já é muito debatido aqui. A meu ver, poderia sim, mas sem fazer analogia com a mecânica clássica, talvez alertando para a ruptura e só. (A6S).

Como podemos notar nas respostas acima, a maioria dos licenciandos observados na UFBA concorda com que seria possível abordar alguns temas de MQ no EM. No entanto, há diversas críticas a respeito da inserção de alguns conteúdos. As opiniões denotam vários tipos de alertas e restrições, tais como: precária formação, dificuldade dos temas, desinteresse dos alunos, dificuldade das escolas públicas, matematização exacerbada da MQ, a incômoda ruptura com a Física Clássica, plano de curso sobrecarregado, quantidade insuficiente do número de aulas, a forma como esses conteúdos serão apresentados, escassez de material, enfim, o que se nota na análise de suas respostas são incertezas e preocupações, frutos de uma formação inadequada que, a nosso ver, não se preocupou em mostrar a MQ e seu desenvolvimento como parte de um processo histórico, produto do dia a dia dos licenciandos e da maioria das pessoas que convivem com essa miniaturização da eletrônica e da nanotecnologia, e que somente podem ser apreciadas pelo entendimento dos seus postulados, como Muller & Weisner (2002) sinalizam:

“A Mecânica Quântica, portanto, molda a nossa visão da natureza, de um modo fundamentalmente novo. Pensamos que não só os físicos devem possuir o privilégio de entender a maneira como o mundo funciona. Cidadãos formados deveriam ter pelo menos a possibilidade de poder apreciar a beleza e os estranhos aspectos dos fenômenos quânticos²⁰” (p.200, 2002).

Nesse sentido, entendemos que há um despertar natural para esses fundamentos, uma vez que chama a atenção, faz parte da vida das pessoas e, conseqüentemente, exige do professor formador uma instrução mais adequada, mais eficiente sob a ótica de uma compreensão conceitual da MQ, na perspectiva de que seus licenciandos em Física possam, como futuros professores, inserir e repassar alguns desses conhecimentos científicos para o Ensino Médio de forma mais significativa, tornando-se capaz de

²⁰ Tradução nossa.

compreender as relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade, relevante para o seu posicionamento crítico em diferentes situações de sua vida cotidiana.

Assim sendo, o Físico-educador deve associar a essas competências, algumas habilidades no sentido de dinamizar ou enriquecer as suas aulas, recorrendo ou fazendo uso de recursos audiovisuais, experimentos virtuais e outras ferramentas que, contextualizadas, dão um acréscimo diferencial à estrutura curricular da disciplina em questão, fugindo assim de um aspecto mais quantitativo, além de dar um significado mais consistente aos aspectos conceituais e fenomenológicos. Evidentemente, não estamos aqui defendendo que esses recursos por si só irão proporcionar uma aprendizagem sem falhas. Defendemos, sim, que o seu uso deva ser uma ferramenta auxiliar a mais na construção desses conhecimentos, com os devidos cuidados de não restringi-la a apenas fornecer informações desarticuladas das abordagens realizadas em sala de aula. Poucas intervenções em sala de aula ocorreram nesse sentido.

6.4 ENADE (Exame Nacional de Estudantes)

O ENADE foi criado pelo Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior – Sinaes -, instituído através da Lei no 10.861, de 14/04/2004, tem como objetivo assegurar o processo continuado de avaliação das instituições de educação superior, dos cursos de graduação e do desempenho dos estudantes. Esse tipo de exame, realizado com estudantes de cursos superiores²¹, tem como objetivos:

- Aferir seus desempenhos em relação aos conteúdos programáticos previstos nas Diretrizes Curriculares dos cursos de graduação a nível nacional;
- Avaliar suas habilidades para ajustar-se às exigências decorrentes da evolução dos conhecimentos;
- Avaliar suas competências para compreender temas exteriores ao âmbito específico de sua profissão, relacionados tanto à realidade brasileira e mundial quanto às outras áreas do conhecimento. (BRASIL, 2004).

Orientadas por essas perspectivas do SINAES, as universidades brasileiras foram instigadas a constituir um documento, produzido por seus professores, que se amoldasse a esses objetivos e ao que sinalizam as novas Diretrizes Curriculares Nacionais para

²¹ Cada curso de graduação é avaliado de 3 em 3 anos. Além de responder às provas, os estudantes devem preencher um questionário que visa identificar o seu perfil e dos cursos em avaliação.

Formação de Professores (CNE/CP 1/2002) e a Lei de Diretrizes e Bases (LDB) nº 9394/96. Assim, nasceu o Projeto Político Pedagógico (PPP). O PPP da Licenciatura em Física, por exemplo, tem o propósito de oferecer ao Físico-educador um plano curricular mais próximo de sua realidade, buscando novas reflexões e possibilidades, garantindo que esse futuro professor possa ser capaz de protagonizar as competências e habilidades sugeridas nas Diretrizes Curriculares dos cursos de formação. Assim sendo, como produto final, esse licenciando em Física estará apto a executar as metas recomendadas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais, no que se refere a “Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias”, apontando explicitamente a introdução, no Ensino Médio, de temas ligados à estrutura da matéria e suas nuances quânticas:

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas. Mas será também indispensável ir mais além, aprendendo a identificar, lidar e reconhecer as radiações e seus diferentes usos. Ou seja, o estudo de matéria e radiação indica um tema capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico (Brasil, p.78, 2002).

Como podemos perceber, há uma estrutura envolvendo cursos, currículos e avaliação, que tem como balizador esse exame (ENADE). Ele tornou-se um componente curricular obrigatório, com o papel de avaliar a aprendizagem e o desempenho acadêmico dos licenciandos, exigindo e verificando se houve ou não uma satisfatória compreensão dos conhecimentos científico e tecnológico, como resultado de uma construção humana, dentro de uma conjuntura social. Além disso, esse exame busca avaliar as competências e habilidades dos estudantes, através de questões, objetivas e discursivas, que priorizam temas contextualizados e atuais, dentro de uma perspectiva específica e de formação geral (BRASIL, 2004).

Assim, este subitem tem como objetivo analisar se os conteúdos presentes nas questões do ENADE, de 2005 e 2008, anos em que os cursos de Física (Bacharelado e Licenciatura) foram avaliados, sinalizam para as suas Diretrizes Curriculares e para os Parâmetros Curriculares Nacionais. Ou seja, se contemplam as competências e habilidades necessárias à formação de professores de Física (no caso específico das Licenciaturas) em relação aos fundamentos da MQ, procurando verificar como se dá a articulação e compreensão desses fundamentos, além de analisar a composição dos

problemas ali propostos. Considerando-se que, para se submeter às provas citadas, os concluintes deveriam ter no mínimo 80% das disciplinas cursadas, fica evidente que eles ou já tinham cursado ou estavam cursando as disciplinas cujas ementas contemplam a Física do século XX e a MQ.

Para analisar as provas de Física do ENADE, nos reportaremos às questões de múltipla escolha e discursivas tanto do núcleo comum (Bacharelado e Licenciatura) quanto as específicas para a Licenciatura, conforme está descrito na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Discriminação das questões analisadas

ENADE Lic. em Física	Questões do núcleo comum – múltipla escolha	Questões específicas – múltipla escolha	Questões discursivas	Total de questões
2005	17	8	5	30
2008	19	8	3	30

Os referidos exames foram realizados nas dependências das próprias universidades (UFBA e UEPB). A UFBA, diferentemente da UEPB que só possui Licenciatura, envolveu todos os alunos do Bacharelado e da Licenciatura. Cada prova teve uma duração de 4 (quatro) horas, com a finalidade de compor o perfil dos estudantes nos respectivos cursos, além de investigar a capacidade de compreensão de cada um deles frente à sua trajetória no curso, utilizando-se de questões objetivas que exploraram a função social da profissão e os aspectos fundamentais da formação profissional do Físico.

Analisando as provas em seu conjunto, para um universo de trinta questões, em ambos os anos, tivemos as seguintes distribuições:

Tabela 2 - Conteúdos das questões

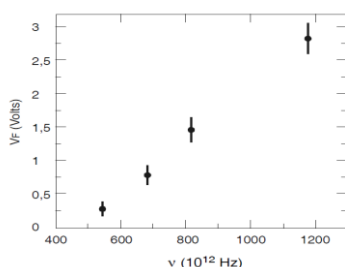
Ano	Fis. Clássica	Fis. Moderna	T. Relatividade	Outros assuntos
2005	20	3	3	4
2008	21	3	1	5

Considerando o foco de nossa pesquisa (*formação de professores de Física em relação à Mecânica Quântica*) e os objetivos deste subitem, interessa-nos analisar apenas as questões relativas à Física Moderna e suas relações com a MQ. Assim sendo, vamos analisar 6 questões, que abordam os temas: modelo atômico de Bohr, efeito fotoelétrico

e dualidade onda-partícula. A maioria das questões selecionadas e abordadas nas provas faz parte da Física Moderna, com conteúdos híbridos, ou seja, abordando parte clássica e quântica num mesmo fenômeno. Apesar de estarem em provas de anos diferentes, as questões aqui analisadas possuem o mesmo foco: os mesmos aspectos conceituais. Além disso, essas questões têm o mesmo perfil daquelas que fizeram parte do roteiro de resolução diária das disciplinas oferecidas aos licenciandos analisados, com exceção das questões 22/2005 e 29/2008. No total das seis questões, em apenas uma, era solicitado do aluno que utilizasse cálculos para a sua resolução.

Vejamos inicialmente as questões 21/2005 e 42/2008, que apresentam uma abordagem sobre efeito fotoelétrico:

21. Ao incidir em uma superfície metálica, a radiação eletromagnética pode produzir a emissão de elétrons. Esse fenômeno, conhecido como efeito fotoelétrico, foi explicado por Einstein, em 1905. A equação por ele proposta para esse efeito pode ser escrita como: $eV_F = h\nu - W$, onde: (V_F) é o potencial de freamento; (e) é carga do elétron; (h) é constante de Planck; ν frequência da radiação e W é a função trabalho do metal. A partir de uma experiência, obteve-se o valor do potencial de freamento, V_F , em função da frequência ν da radiação que incide sobre a superfície de um determinado metal, como representado no gráfico abaixo. Dado $h = 4,1 \times 10^{-15}$ eVs . A partir do gráfico, o valor de W , em eV, é:



- (A) $1,0 \pm 0,1$
- (B) $2,1 \pm 0,2$
- (C) $3,5 \pm 0,1$
- (D) $4,8 \pm 0,5$
- (E) $6,0 \pm 1,0$

42. Hertz, no experimento em que evidenciou a existência das ondas eletromagnéticas, notou que a descarga elétrica no sensor era mais facilmente percebida quando este era iluminado com luz de frequência acima de um certo valor. A explicação de Einstein para este efeito, denominado fotoelétrico, considera que:

- (A) o aumento da intensidade da luz implica um aumento do número de fótons de mesma energia que incide sobre o sensor.
- (B) o intervalo de tempo entre a chegada da luz ao sensor e a emissão dos elétrons é diferente de zero.
- (C) a luz se comporta como onda no momento em que ocorre o efeito.
- (D) a energia dos elétrons que saem do sensor depende diretamente da intensidade de luz incidente.
- (E) a energia do fóton incidente é igual à energia cinética do elétron atingido.

O efeito fotoelétrico é foco central das disciplinas que abordam conteúdos dessa natureza, a exemplo de Estrutura da Matéria I e Física Moderna, pelo fato de ser um experimento, em princípio simples e os resultados surpreendentes, além de ser um assunto em evidência no Ensino Médio, presente nos vestibulares e, consequentemente,

bastante discutido pela maioria dos alunos observados, em especial aqueles que já lecionam nas escolas públicas e particulares, como verificamos.

- Eu dou esse assunto no final da quarta unidade, no terceiro ano (A2S);
- O efeito fotoelétrico e o modelo atômico de Bohr são questões certas no vestibular (A1).

Além disso, é um dos assuntos da Física Moderna mais presentes nos livros didáticos utilizados no Brasil, que de certa forma terminam por influenciar e organizar fortemente os conteúdos que são normalmente trabalhados em sala de aula pelos professores do Ensino Médio, quando são cobrados para ensinar “Física Moderna”. No contexto das disciplinas analisadas, o professor (P1) se preocupou em mostrar um vídeo com explicação e visualização desse fenômeno, ocasionando momentos de aprendizagem, discussões relevantes e significativas, apontando, inclusive, para diversas maneiras de como inseri-lo no Ensino Médio.

- Aproveitem essa ideia pra levar física moderna para o ensino médio, esses tipos de vídeo, eles facilitam a visualização do efeito fotoelétrico, né? Concordam? (P1)

A questão 21/2005 é um exemplo de questão que prioriza o aspecto matemático, com uma aplicação direta da expressão, levando o aluno a um raciocínio matemático, em função de uma frequência mínima. De acordo com o gráfico, ligando os pontos relativos aos valores experimentais e traçando uma reta até intersectar com a abscissa, teremos ali um valor de frequência próximo de $500 \cdot 10^{12}$ Hz, a partir da qual ocorrerá a emissão de elétrons do metal, com $eV_F = 0$. Aplicando esses valores à expressão fornecida no problema, obteremos a sua resposta, que deverá nos conduzir à proposição de letra (B) como correta. Além disso, adotando a expressão dada no problema como uma função linear, o termo (w) é, matematicamente, ponto de corte da ordenada.

A questão 42/2008, específica para a Licenciatura, deu ênfase ao aspecto conceitual do efeito fotoelétrico, abordando explicitamente a relação entre a frequência da radiação luminosa incidente e a ocorrência perceptível de descargas elétricas entre sensores, associando esse fenômeno ao efeito fotoelétrico estudado por Einstein. O núcleo do efeito fotoelétrico envolve justamente o compromisso entre a frequência da radiação incidente e a sua capacidade em produzir liberações de elétrons em superfícies metálicas.

Avaliando as alternativas oferecidas, sugerimos como resposta correta a letra (A), pois o aumento na intensidade da luz resulta precisamente no aumento da taxa com que os

fótons são liberados pela fonte luminosa e, portanto, que deverão atingir o sensor. Se haverá ou não liberação de elétrons do sensor, vai depender da frequência com que esses fótons são emitidos. A letra (B) das proposições chama a *atenção* pelo fato de que sendo o efeito fotoelétrico quântico, não deverá existir um intervalo de tempo definido para sua ocorrência, sendo, portanto, instantâneo.

A questão 22/2005 possui significado quântico, enfatiza o lado histórico e experimental da interferência de objetos quânticos. Vejamos:

22. Em uma carta à revista *American Journal of Physics* (Am. J. Phys. v. 63, janeiro/1995), Roy Glauber, Prêmio Nobel de Física deste ano, discute a interpretação de resultados de experiências sobre interferência de fótons, que visam contradizer a seguinte afirmação de Paul Dirac, também Prêmio Nobel de Física, sobre a experiência de Michelson: “*Cada fóton só interfere consigo mesmo. A interferência entre dois fótons não pode ocorrer nunca*”. Numa das experiências comentadas por Glauber, cientistas franceses obtiveram franjas de interferência entre dois lasers distintos, mas bem sintonizados entre si, e interpretaram o resultado como interferência entre fótons.

Tendo em vista esses resultados experimentais, considere as seguintes ponderações.

- I. A afirmação de Dirac está incorreta, pois seu argumento só se aplica à interferência quântica.
- II. Em relação aos fótons, a interferência quântica e a interferência clássica são fenômenos idênticos.
- III. A afirmação de Dirac está correta contrariando a interpretação dos cientistas franceses.

Estão corretas SOMENTE as ponderações

- (A) I
- (B) II
- (C) III
- (D) I e II
- (E) II e III

Essa questão consegue mostrar algo além da proposta do fenômeno da interferência para luz, gerando controvérsias acerca de suas interpretações. De fato, Dirac teria dito essa frase (Dirac, 1958, p.9), argumentando a favor de que o princípio da superposição de estados quânticos é a hipótese fundamental da MQ, a partir da qual se estabelece a estrutura linear da teoria, evidenciando-se o fenômeno para uma única partícula ou para muitas partículas, no qual apenas se acentua a intensidade do fenômeno.

À época dessa frase, a questão da dualidade para a luz, estava muito evidente, pois os experimentos relativos ao efeito fotoelétrico eram uma realidade, no sentido de comprovação em favor da sua natureza corpuscular, além do seu caráter ondulatório, historicamente comprovado. Além disso, não se dispunha de outros recursos, sendo que as fontes usadas nas experiências eram de uma luz comum e quando de intensidade muito tênue, dizia-se constituída de fótons. Para Dirac (p. 9, 1958), um feixe de luz, constituído de um grande número de fótons, antes de atingir as fendas de um interferômetro, está em um estado de superposição, conectado por uma função de onda. Após as fendas, teremos dois outros estados superpostos, ou seja, uma soma algébrica de amplitudes de probabilidades. Portanto, não faz sentido pensar em interferência entre

fótons diferentes, pois assim sendo, teríamos algumas vezes uma aniquilação ou uma soma de quatro fótons, o que contradiz o princípio da conservação da energia.

No entanto, no contexto da Óptica Quântica Moderna, a segunda asserção não é sempre correta, como nos assegura Paul, H. (1986), sendo possível produzir interferência entre dois lasers distintos e sincronizados, fundamentada na teoria quântica. Para isso, não podemos pensar os fótons como partículas, mas como amplitudes de probabilidade, como nos assegura Glauber (1995) na carta mencionada no problema. Assim, o argumento usado por Dirac para não observação do fenômeno da interferência entre dois fótons, é semiclássico, o que termina por tornar verdadeira a proposição (I).

Usando os argumentos expostos acima, podemos assegurar que a proposição (II) está incorreta, no sentido de que o tratamento dado à interferência de objetos quânticos é intrínseco a sua função de onda, localizando-se espacialmente, quando eles atingem uma tela após as fendas. Diferentemente, uma interferência de ondas clássicas é um fenômeno que ocupa toda a região do espaço, após as fendas, projetando-se numa tela.

O fato de ter citado as novas pesquisas realizadas, incluindo também o lado histórico na presença de um dos pilares da teoria quântica, P. Dirac, mostra-se como um exemplo adequado a ser seguido pelas disciplinas que contemplam as teorias quânticas, em especial nos cursos de formação em Física. Nesse sentido, o ENADE cumpre o seu papel, quando promove a articulação entre o conhecimento científico e o pedagógico e as competências e habilidades expressas nas Diretrizes Curriculares para a Licenciatura em Física. De forma implícita, as Diretrizes propõem que o Físico-educador seja capaz de:

- Reconhecer as relações do desenvolvimento da Física com outras áreas do saber, tecnologias e instâncias sociais, especialmente contemporâneas.

No entanto, analisando nossos dados de observações, entrevistas e documentos didáticos, percebemos que essa habilidade pouco foi contemplada nas disciplinas acompanhadas, havendo, portanto, uma convergência muito tímida, no sentido de articular esses conhecimentos com as questões sociais, históricas, culturais, políticas e econômicas. Além disso, dificilmente os estudantes se deparam, durante a sua formação em Física (Licenciatura e Bacharelado), com as nuances desse tipo de questão e suas consequências históricas, filosóficas e tecnológicas. Como nos alerta Greca e Herscovitz (2002), apesar da importância do “princípio da superposição de estados quânticos”, o

mesmo quase não é abordado nos cursos de formação, quer introdutório, quer mais avançado, e, muitas vezes, desconhecido até dos próprios físicos.

Além disso, percebe-se no contexto da questão, que o elaborador apela à autoridade do cientista (Glauber), mostrando que a frase dita por Dirac está errada. Num campo como a Física, é razoável acreditar-se em uma alegação feita por um Físico sobre algo pertencente à Física, e que outros Físicos considerem ser verdade. Presumivelmente, esses creem nela por haver fortes evidências para apoiá-la. Crenças como essas poderiam revelar-se falsas, é claro, mas deve ser óbvio que nenhuma crença se torna verdadeira com base em quem lhe dá crédito.

A questão 24/2005 apresenta também um bom contexto histórico. Vejamos:

24. A introdução da constante h por Planck, para interpretar o espectro de radiação de um corpo negro em função de sua frequência e temperatura, era de início uma hipótese provisória, segundo ele próprio, mas que acabou por tornar-se definitiva e dar origem a uma nova física. Entre as muitas razões para que o caráter provisório dessa constante se tornasse definitivo, foi a sua utilização como apoio teórico para a:

- (A) obtenção da expressão empírica da posição das linhas do espectro do hidrogênio (fórmula de Balmer) e a proposta do modelo atômico do “pudim de passas”, de Thomson.
- (B) obtenção da razão carga/massa do elétron e a proposta do modelo atômico de Rutherford.
- (C) proposta do modelo atômico de Bohr e a dualidade onda-partícula de Broglie.
- (D) postulação da constância da velocidade da luz e a proposta relativística da deformação do espaço-tempo.
- (E) descoberta da radioatividade artificial e a descoberta da equivalência massa-energia.

Notadamente, para a perspectiva apresentada no contexto da questão, onde se evidencia a constante de Planck, a única resposta evidente é a letra “C”. As demais proposições não se relacionam com o “quantum de ação”, que é considerado uma das essências da MQ, no sentido de diferenciar objetos clássicos dos quânticos. Devemos lembrar que, apesar do uso da constante no modelo atômico de Bohr e no experimento do efeito fotoelétrico, dando um caráter quântico à energia do fóton, foi só com os resultados dos experimentos de Compton que essa realidade passou a ser aceita e, a partir daí, passou-se a discutir a dualidade onda-partícula para a luz proposta por De Broglie. Ademais, esse é um dos assuntos considerados “porta de entrada” da maioria dos livros textos utilizados no ensino médio e superior, no qual se enfatiza a existência de quantidades discretas ou pacotes de energia. Foi um dos assuntos abordados pelos professores PS1 e P1, nas respectivas disciplinas Estrutura da Matéria I e Física Moderna. Assim como no efeito fotoelétrico, esse assunto foi bastante discutido pelos alunos, pelo fato de que esse também já faz parte do rol de assuntos de “Física Moderna” que são exigidos nos concursos vestibulares.

As questões 26 e 29/2008 revelam os aspectos teóricos e semiclássicos do modelo atômico de Bohr, para o átomo de hidrogênio, através dos seus postulados, incluindo também falsas concepções desse modelo em suas proposições. Vejamos:

26. Sobre o Modelo Atômico de Bohr, são feitas as seguintes afirmações:

I - o átomo é composto de um núcleo e de uma eletrosfera;

II - o momento angular orbital do elétron é um múltiplo inteiro de $h / 2\pi$, onde h é a Constante de Planck;

III - a frequência da radiação eletromagnética emitida pelo átomo varia continuamente entre os dois valores correspondentes às órbitas de maior e menor energia.

Para Bohr, é verdadeiro **SOMENTE** o que se afirma em:

(A) I

(B) II

(C) III

(D) I e II

(E) II e III

29. Do ponto de vista da Física Moderna, a respeito do espectro de energias do oscilador harmônico, são feitas as seguintes afirmações:

I - o espectro de energia é contínuo;

II - o espectro de energia é discreto;

III - em acordo com o Princípio da Correspondência de Bohr, para grandes números quânticos a separação de energias entre dois níveis consecutivos torna-se desprezível quando comparada com estas energias.

Está (ão) correta(s) **APENAS** a(s) afirmação (ões):

(A) I

(B) II

(C) III

(D) I e II

(E) II e III

Trata-se de questões que remetem a conteúdos trabalhados em sala de aula, nas disciplinas observadas, exigindo dos alunos um conhecimento relativo às correções realizadas por Bohr, através dos seus postulados, tendo em vista o modelo atômico de Rutherford. Para responder a questão 26, o aluno teria que ter um conhecimento detalhado desses postulados. Na proposição (I), Bohr sugeriu que o elétron só poderia orbitar o núcleo em órbitas circulares, com energias bem definidas (quantização de energia). Para a proposição (II), o momento angular sugerido estava em concordância com a teoria de Bohr, denotando que o seu módulo é proporcional ao número quântico (n) principal e que sempre assume valores inteiros e positivos. A proposição (III) está errada, pois ao contrário do que afirma, a frequência da radiação eletromagnética é descontínua. Portanto, a letra correta é a (D). A partir do que observamos em sala de aula, acreditamos que os alunos apresentam-se aptos para o nível dessas questões propostas pelo ENADE, uma vez que o modelo atômico de Bohr, foi um dos assuntos amplamente discutido, como revelamos no capítulo anterior, levando alguns alunos a reverem seus conceitos e, posteriormente, sendo capaz de apresentar um bom desempenho nos exercícios e provas.

A questão 29 relata, de forma ampla e articulada, dois assuntos próprios das disciplinas de Física Moderna ou Estrutura da Matéria I e Mecânica Quântica: Princípio da correspondência de Bohr e energias do oscilador harmônico, respectivamente. Suas proposições remetem ao conhecimento adquirido em ambos os assuntos. No princípio da correspondência, Bohr mostra que para grandes números quânticos, a diferença entre níveis de energia (para o átomo de hidrogênio) atinge limites da Mecânica Clássica, tornando a proposição (III) verdadeira. Analisando a energia potencial de um oscilador harmônico, a partir da equação de Schroedinger independente do tempo, percebe-se que a mesma gera um conjunto de estados de energia discretos, com $n = 0, 1, 2, \dots$, tornando a proposições (II) verdadeira e comungando com a alternativa (E).

Os assuntos abordados nas questões 26 e 29/2008 fazem parte das ementas das disciplinas observadas. No entanto, de acordo com nossas observações escritas, só encontramos na disciplina de MQ, uma aula em que o professor P2 fez referência à energia potencial de um oscilador, envolvendo-a no entendimento das vibrações moleculares, no qual descreveu todo o aparato matemático que a caracteriza. Reconhecemos, entretanto, que a noção de espectro de energia contínua e discreta foi trabalhada durante as aulas sobre a radiação do corpo negro e o seu entendimento por Planck.

6.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O PPP de um curso é o referencial dos professores com relação às Diretrizes Curriculares. É a partir dele que se oferece aos futuros professores uma sólida formação, em especial nos fundamentos da MQ, tornando-os capazes de reproduzir ou minimamente associar, conceitual e metodologicamente, de forma satisfatória e significativa, tópicos dessa natureza no Ensino Médio ou nos espaços em que atuam ou irão atuar como Físico-educador.

Sentimos ausência do PPP no curso de Licenciatura em Física da UFBA, o que terminou por provocar uma desarticulação entre o que o professor almejou para os seus alunos, durante o curso de sua disciplina, e o que as diretrizes curriculares esperam que cada disciplina atinja. Nossos resultados sugerem que a formação desses licenciandos em Física, dentro dessa perspectiva analisada, não se adequa às recomendações expressas na LDB ou nas Diretrizes Curriculares Nacionais.

O PPP do curso de Licenciatura em Física da UEPB está bem articulado teoricamente, no sentido de que as suas diretrizes apontam para uma articulação entre a teoria e a prática das disciplinas que compõem o seu quadro, além de sinalizar para as competências e habilidades sugeridas pelas Diretrizes Curriculares Nacionais. Por outro lado, em sala de aula, sua orientação não exerce influência relevante. Ou seja, as aulas das disciplinas por nós observadas não se mostraram suficientemente alinhadas com essas competências e habilidades, explorando muito mais o aspecto técnico da MQ do que o seu lado conceitual.

Constatamos, durante a análise dos documentos acima descritos, que qualquer tentativa de melhoria do processo ensino-aprendizagem em Física, em especial no que se refere aos fundamentos da MQ, deve necessariamente apontar para o problema da qualidade de ensino dos cursos de formação. Fugir dessas premissas seria não contemplar as competências e habilidades sugeridas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais, quando se refere a “Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias”, assinalando explicitamente a introdução de temas de FMC para Ensino Médio, como:

A natureza ondulatória e quântica da luz e sua interação com os meios materiais, assim como os modelos de absorção e emissão de energia pelos átomos, são alguns exemplos que também abrem espaço para uma abordagem quântica da estrutura da matéria (BRASIL, 2002).

São nesses documentos que se devem concentrar esforços, no sentido de que a sua utilização deverá refletir sobre a aprendizagem dos futuros professores, contribuindo para aumentar a qualidade do processo como um todo, inclusive apontando para os assuntos que devam ser pontuados nas ementas das disciplinas que versam sobre conteúdos essencialmente quânticos.

Analisando os conteúdos das seis questões das respectivas provas, salvo a questão 22/2005, percebemos que não houve uma preocupação com os aspectos fenomenológicos dos fundamentos da MQ, em especial, para os licenciandos. Pelo contrário, os exames aqui analisados mostraram-se fortemente associados a uma Física semiclássica, focalizando muito mais aspectos da MQ inicial, do que uma associação com aspectos mais interessante do seu desenvolvimento. Há aqui uma contradição. Se as Diretrizes Curriculares para a Licenciatura em Física e os Parâmetros Curriculares Nacionais apontam para essas competências na formação de professores, e se esses documentos destacam a importância de não dissociar conhecimentos pedagógicos dos conhecimentos tecnológicos atuais e específicos, não há como esperarmos uma

formação adequada a esse respeito, visto que o próprio ENADE, enquanto instrumento avaliativo e regulador do Ensino Superior, não tem privilegiado tal relação, sobrepujando os novos conhecimentos contemplados nas diretrizes, em favor do excessivo uso da Mecânica Clássica (70% das questões) e da “velha Mecânica Quântica”, quando a literatura aponta que inserir elementos históricos da velha Mecânica Quântica, em disciplinas introdutórias, devem ser evitados (GRECA e FREIRE Jr. 2012), no sentido de que esses assuntos (problema do corpo negro, efeito fotoelétrico, modelo atômico) não contribuem para um aprendizado de conteúdos essencialmente quânticos.

As poucas questões sinalizadas no ENADE nos reportam às mesmas questões encontradas em livros do Ensino Superior e Médio, com pouquíssimas diferenças, muito mais em termo de linguagem utilizada do que em termo de complexidade. Além disso, a maioria são questões análogas às que são trabalhadas em sala de aula, através das disciplinas que se preocupam com a estrutura da matéria ou Física Moderna. Dessa forma, percebemos que, nas avaliações dos ENADES, foi dado maior destaque a aspectos relacionados com o domínio de conteúdos semiclássicos em detrimento da formação do futuro professor, com relação a outras competências, por exemplo, a desenvolver estratégias de ensino para situações novas, no qual os assuntos contemplassem as nuances quânticas relacionadas com a compreensão do mundo das partículas microscópicas, conforme predizem os objetivos do ENADE e como foi possível vislumbrar no debate histórico e filosófico que há por trás da questão 22/2005.

Assim, percebem-se caminhos e competências opostas quanto ao foco dado: os cursos de formação em Física apontam fortemente para os aspectos de resolução de problemas, enquanto que o ENADE sinaliza para os aspectos conceituais. No entanto, em relação ao conteúdo, ambos acentuam, muito mais, os aspectos semiclássicos da estrutura da matéria. Dessa forma, o processo de aprendizagem e o desempenho acadêmico dos estudantes previstos nas Diretrizes Curriculares das Licenciaturas em Física, suas habilidades para ajustar-se às exigências decorrentes da evolução do conhecimento e suas competências estão sendo contemplados de forma superficial.

7. CONCLUSÕES

...all historical experience confirms that men might not achieve the possible if they had not, time and time again, reached out for the impossible.²²

Max Weber (1864 – 1920)

Os resultados de nossa pesquisa indicam que a formação de licenciandos em Física, nas Universidades Federal da Bahia e Estadual da Paraíba, em relação aos fundamentos da MQ, a partir das disciplinas consultadas e que oferecem em suas ementas esses tipos de conteúdos, não ocorre de forma satisfatória. A pesquisa desenvolveu-se, englobando não apenas observações de sala de aula, mas também análises de entrevistas com licenciandos e professores das disciplinas acompanhadas, além da análise de documentos didáticos e oficiais. Todas essas ferramentas, com suas respectivas informações, nos subsidiaram a responder a pergunta da nossa pesquisa, indicando-nos que a formação de licenciandos em Física em relação a esses fundamentos, é inadequada. Essa inadequação é muito mais preocupante, quando entendemos que esses licenciandos deverão disseminar esses conhecimentos no ensino médio.

A MQ apresentada nos moldes das disciplinas consultadas, nas Universidades citadas, priorizou fortemente os seus aspectos instrumentais, em detrimento da discussão e apropriação dos conceitos da própria teoria. Embora as abordagens formais sejam necessárias a qualquer curso de Física, pois constituem ferramentas para a resolução de problemas dessa área, sua exploração excessiva, sem o acompanhamento de estudos de aspectos conceituais, históricos e filosóficos, não produziu os efeitos de aprendizagem esperados. Como podemos perceber, a construção do conceito do fóton, quase sempre, ancorou-se em elementos clássicos, de acordo com as situações experimentais propostas. Essa inadequação ocorreu também em outras situações, como por exemplo, o conceito de estado quântico, superposição de estados, colapso da função de onda. Assim, a compreensão de alguns princípios e postulados quânticos parece fadada a esmorecer no ambiente em que deveria ser estimulada.

²² Toda a experiência histórica confirma que os homens não teriam alcançado o possível caso não tivessem, por várias e várias vezes, estendido a mão ao impossível.

Os resultados desta pesquisa apontam para a existência de um processo contraditório na formação do professor de Física, no que se refere a conteúdos disciplinares: considerando a influência da tecnologia baseada na MQ, no cotidiano dos alunos, os futuros professores reconhecem a necessidade de inclusão dos fundamentos quânticos no Ensino Médio, no entanto resistem a ensiná-los, afirmando falta de embasamento suficiente para tal. E essa falta de embasamento se refere tanto ao conteúdo propriamente dito quanto à abordagem didática, pois a que foi desenvolvida nas aulas do curso de graduação foi, sobretudo, aula expositiva acompanhada de exercícios.

Associando-se esse procedimento às competências e habilidades necessárias à formação do Físico-educador, percebe-se uma lacuna no que diz respeito ao uso de recursos didáticos variados (multimídia, experimentos virtuais, entre outros) que contribuem para facilitar a compreensão dos conteúdos curriculares, por parte de licenciandos, produzindo resultados satisfatórios de aprendizagem. Evidentemente, não estamos aqui defendendo que esses recursos por si só irão proporcionar uma aprendizagem sem falhas. Defendemos, sim, que o seu uso deva ser uma ferramenta auxiliar a mais na construção desses conhecimentos, com os devidos cuidados de não restringi-la a apenas fornecer informações desarticuladas das abordagens realizadas em sala de aula. Por outro lado, a literatura tem nos mostrado, que são poucos desses experimentos com resultados de aprendizagem que chegam ao conhecimento dos professores do Ensino Médio e dos licenciandos em Física. Necessário se faz que, os professores dos cursos de formação sejam articuladores, entre as novas pesquisas divulgadas e seus alunos, no sentido de estimular e promover o contato deles com essas ferramentas didáticas.

Os resultados apontam para uma ausência de algum tipo de discussão, que levasse em consideração a questão do significado das interpretações filosóficas inerentes à MQ, ou seja, não houve, por parte dos professores, preocupação com problemas ligados às controvérsias que marcaram o surgimento da teoria quântica; simplesmente eles ignoraram. Favorecendo esse quadro, as ementas das disciplinas analisadas e os documentos oficiais, não fazem referências a essa questão, enquanto que os livros utilizados fazem apenas referências, breves e opcionais, ao tratar de problemas ligados à interpretação dos fundamentos da MQ. Não obstante, acreditamos que inserir uma reflexão mais acentuada das suas leis, contida nos seus postulados, necessária à compreensão das características quânticas dos sistemas microscópicos, deverá oferecer

aos professores de Física em formação, uma contribuição mais crítica e menos formalista da MQ.

Observamos nessa pesquisa, a partir das leituras e de nossa análise aos documentos oficiais, que o ENADE pouco contemplou as competências descritas nas Diretrizes para a formação de professores nos aspectos quânticos. Dessa forma, o processo de aprendizagem e o desempenho acadêmico dos estudantes em relação aos conteúdos quânticos previstos nas Diretrizes Curriculares das Licenciaturas em Física, suas habilidades para ajustar-se às exigências decorrentes da evolução do conhecimento e suas competências estão sendo contemplados de forma superficial. É preciso que as Diretrizes Curriculares Nacionais, as Diretrizes dos cursos de Licenciatura em Física, os professores e o ENADE, sinalizem na mesma direção, cumprindo o que estabelecem os seus documentos.

Por fim, tendo em vista a equivalência dos nossos resultados com a literatura, relativos à formação de professores nos aspectos previstos nesta tese, concluímos que o ensino dos fundamentos quânticos realizados de forma tradicional, ainda que a sua inserção no Ensino Médio seja premente, não tem preparado futuros professores aptos para essa inserção. Se quisermos que nossos professores sejam capazes de inserir tópicos de MQ no Ensino Médio, é preciso reavaliar este processo. Nesse sentido, as conclusões assumidas no âmbito desta tese, sugerem que as disciplinas consultadas insiram, em suas ementas, um pouco de história e filosofia dessa ciência, mostrando, por exemplo, as controvérsias sobre seus fundamentos e sobre suas interpretações, como detalhamos no capítulo da fundamentação teórica, que enfatizem as características essencialmente quânticas, impedindo que os alunos estabeleçam ligações indesejáveis com a Física clássica e a disseminação de conceitos errôneos e fantasiosos relativos à MQ. Utilizar tais debates como objeto de estudo deverá propiciar um contato com os postulados quânticos, inclusive com seus aspectos formais, servindo de estímulo para a realização de seminários e discussões sobre as inovações tecnológicas surgidas a partir dessas controvérsias.

REFERÊNCIAS

ASPECT, A & GRANGIER, P. De Fótons Emaranhados a Bits Quânticos. **Scientific American Brasil**. Edição Especial: Todos os Estados da Luz. São Paulo: Duetto editorial, 2006.

ASPECT, A; *et al.* **Physical Review Letters**. vol. 39, p. 1804, 1982.

BARROS, M. A. & BASTOS, H. F. B. N. Investigando o uso do CEK na compreensão do conceito de difração de elétrons. **Cad. Bras. Ens. Fis.**, v.24, n.1: p. 26-49, abr. 2007.

BELL, J. S. On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. **Physics**, v. 1, n. 3, p. 195-200, 1964.

BELL, J. S. On the problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics. **Reviews of Modern Physics**, v. 38, p. 447-452, 1966.

BILAL, E. & EROL, M. **Student understanding of some Quantum Physical concepts**: Wave function, Schrödinger's wave equation and wave-particle duality. Sixty International Conference of the Balkan Physical Union. American Institute of Physics, Melville, 2007.

BOHM, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. **Physical Review**, v.85, n.2, p. 166-179, 1; v.85, n.2, p. 180-193, 1952.

BOHR, N. Atomic Theory and the description of Nature: Four essays with an introductory Survey. **First Paperback Edition**. Cambridge: University Press, 2011.

BOHR, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? In: **Physical Review**, v. 48, p. 696-702, 1935.

BOHR, N. Física Atômica e Conhecimento Humano: **Ensaio** 1932 – 1957. Tradução Vera Ribeiro. Ed. Contra Ponto. Rio de Janeiro, 1995.

BRASIL, **Lei nº 10.861**, de 14 de abril de 2004. Institui o Sistema Nacional de Avaliação da Educação Superior – SINAES e dá outras providências. Brasília, 2004.

BRASIL, **PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Ciências da natureza, Matemática e suas tecnologias. Ministério da Educação/Secretaria da Educação Média e Tecnológica, Brasília, 2002.

BRASIL. Parecer CNE/CES 1.304, de 06 de Dezembro de 2001 - **Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física**. Brasília/DF/BR: Diário Oficial da União, 7 de Dez. de 2002, Seção 1, p. 25. 2002c.

Disponível em: < <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1304.pdf> >. Acesso em: 03/05/2011.

CARUSO, F & OGURI, V. **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

CARUSO, F & OGURI, V. **Física Moderna: Exercícios Resolvidos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

CRUZ, F. F.S; JUNIOR, M. F. R. Física Moderna e Contemporânea na formação de licenciandos em Física: Necessidades, conflitos e perspectivas. **Ciência & Educação**, v. 15, n. 2, p. 305-21, 2009.

DIRAC, P. A. M. **The Principles of Quantum Mechanics**. Claredon: Oxford, 1958.

EINSTEIN, A; PODOLSKI, B and ROSEN, N. **Physical Review**, vol.47, 777-780, 1935.

EISBERG, R. & RESNICK, R. **Física Quântica**. Ed. Elsevier, Rio de Janeiro, 1979

EULER, M. *et al.* Students' views of models and concepts in modern physics, en Annual Meeting National Association For Research. In **Science Teaching**, Boston, 1999. Collection of papers presented. (www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst).

FAZENDA, I. **Avanços no conhecimento etnográfico da escola**. A pesquisa em educação e as transformações do conhecimento. Campinas, SP: Papirus, 1995.

FISCHLER, H & LICHTFELDT, M. Modern Physics and students' conceptions. **Jour. Sci. Educ.**, vol. 14, n.2, p. 181-190, 1992.

FLETCHER, P. R *et al.* Student difficulties in learning quantum mechanics. **International Journal of Science Education**. London, v. 20, n. 4, p. 427 – 446, apr/may 1998.

FOLSE, H. J. **The Philosophy of Niels Bohr: the framework of Complementarity**. North-Holland Physics Publishing. 1985.

FREIRE JR, O. & CARVALHO NETO, R, A. **O Universo dos Quanta: uma breve história da física moderna**. Ed. FTD, São Paulo, 1997.

FREIRE Jr, O. & FREITAS, F. Uma controvérsia Octogenária. **Scientific American Brasil**. Coleção Gênios da Ciência, Edição Quânticos: os homens que mudaram a Física, São Paulo: Duetto editorial, 2006.

FREIRE JR, O. **David Bohm e a controvérsia dos quantas**. Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência. Unicamp, 1999.

FREIRE JR, O. Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and its first experimental tests (1965–1982). *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v.37, p. 577–616. **Elsevier Ltd.**, 2006.

FREIRE JR, O. The Research on the Foundations of Quantum Mechanics and its Implications on Physics Teaching. **IACPE - X InterAmerican Conference on Physics Education**. Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2009.

FREIRE Jr., O; GRECA, I. M. Ênfase conceitual e interpretação no ensino da Mecânica Quântica. In: Olival Freire Jr., Osvaldo Pessoa Jr., Joan Lisa Bromberg. **Teoria Quântica: estudos históricos e implicações culturais**. Campina Grande, Pb: EDUEPB/ Livraria da Física, p. 357-373, 2010.

GASIOROWICZ, S.; **Física Quântica**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1979.

GIL, A.C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2009.

GIL, A.C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GRECA, I. *et al.* Uma proposta para o ensino de mecânica quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v.23, n. 4, p. 444-457, dez. 2001.

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

GRECA, I. M & FREIRE JR., O. Meeting the challenge: Quantum physics on introduction physics courses. **Michael Matthews (ed.), History, Philosophy and Science Teaching Handbook, Springer, forthcoming, 2012.**

GRECA, I. M & HERSCOVITZ, V. Construyendo significados em mecânica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario. **Enseñanza de las Ciencias**, 2, 327-338, 2002.

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

GREENSTEIN, G. & ZAJONC, A. G. **The Quantum Challenge**: Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics. Sudbury, MA. Jones and Bartlett Publishers, 1997.

HEISENBERG, W. **Física e Filosofia**. 4ª edição. Tradução para o português de Jorge Leal Ferreira, Brasília: Ed. Universidade de Brasília, Edições Humanidades (Série Métis), 1984.

IRESON, G. The quantum understanding of pre-university Physics students. **Phys. Edu.** 35(1), january 2000.

JAMMER, M. **The Philosophy of Quantum Mechanics**. Wiley, New York, 1966.

JOHANSSON, K. E & MILSTEAD, D. Uncertainty in the classroom - Teaching Quantum Physics. **Physics Education**, vol. 43(2), 173-179, 2008.

KALKANIS, G. *et al.* An instructional model for a radical conceptual change towards quantum mechanics concept. **Science Education**, 2, 257-279, 2003.

KE. J. *et al.* Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-motor experiences and mental models. **International Journal of Science Education**, 13, 1571-1594. 2005.

KRAGH, H. **Quantum Generations: a History of Physics in the Twentieth century**. Princeton University Press, 1999.

LÜDKE, M & ANDRÉ, M.E.D.A. **Pesquisa em Educação: Abordagens Qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MARCONI, M.A.; LAKATOS, E.M. **Técnicas de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MASSHADI, A. **Students' conceptions of quantum physics**. In WELFORD, G et al. (eds) *Research in Science Education in Europe*. London: The Falmer Press, p. 254 – 265, 1986.

MINAYO, M. C. S. *et al.* **Teoria, método e criatividade**. 27. ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

MONTENEGRO, R. L; PESSOA, O. Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física. **Investigações em Ensino de Ciências**, p. 1 – 20, disponível em: www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n2, 2002.

MÜLLER, R; WIESNER, H. Teaching quantum mechanics on an introductory level. **American Journal of Physics**. v.70, n.3, p.200-209, mar. 2002.

NASHON *et al.* [Whatever happened to STS? Pre-service physics teachers and the history of quantum mechanics](#). **Science & Education**. New York, v.17, n.4, p.387-401. 2008.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. Vol. 4. Ed. Edgard Blücher, 2002.

OLSEN, R. V. Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. **International Journal of Science Education**, 6, 565-574. (2002).

OSNAGHI, S *et al.* The Origins of the Everettian Heresy. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**. V.40, Issue 2, p. 97-123, may 2009.

OSTERMANN, F *et al.* Investigando a aprendizagem de professores de Física acerca do fenômeno da interferência quântica. **Ciência & Educação**, v. 14, n. 1, p. 35-54, 2008.

OSTERMANN, F. e RICCI, T.S.F. Conceitos de Física Quântica na formação de professores: relatos de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, 1, 9-35, 2005.

OSTERMANN, F. e RICCI, T.S.F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre Mecânica Quântica: um estudo na formação de professores de Física. **Ciência & Educação**, 2, 235-258, 2004.

OSTERMANN, F *et al.* Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Vol.8, N°1, 2009.

OSTERMANN, F; MOREIRA M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigação em Ensino de Ciências**. V. 5, n. 1, p. 23-48, mar. 2000.

OSTERMANN, F.; PEREIRA, A. P. Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências** (Online), v. 14, p. 393-420, 2009.

PATTON, M. Q. **Quantitative research and evaluation methods**. 3. ed. California: Sage Publications, Inc; 2002.

PATY, M. **Matéria roubada**. Edusp, São Paulo, 1995.

PAUL, H. Interference between independent photons. **Reviews of Modern Physics**, v. 38, p. 209-231, 1986.

PEREIRA, A. P de. **Fundamentos de física quântica na formação de professores**: uma análise de interações discursivas em atividades centradas no uso de um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. 2008. p. 1-137. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ensino de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2008.

PESSOA JR, O. **Conceitos de Física Quântica**. Vol. 1, Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2003.

PESSOA JR, O. **Conceitos de Física Quântica**. Vol. 2, Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2006.

RICCI, T. F *et al.* O tratamento clássico do Interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 29, n.1, p. 79-88, 2007.

RICHARDSON, R. J *et al.* **Pesquisa social**: métodos e técnicas. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

ROCHA, C. R. **Sobre o ensino do conceito de estado em cursos introdutórios de Mecânica Quântica**. 2008. p. 1-168. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Ensino de Física. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2008.

SCHRÖDINGER, E. Discussion of probability relations between separated systems. **Proc. Cambridge Phil. Soc.**, vol. 31, p. 555-563, 1935.

SCHWABL, F. **Quantum Mechanics**. 2ª Ed., Springer, 1995.

SEGRÈ, E. **Dos Raios-x aos Quarks**. Tradução de Wamberto Ferreira. Ed. UNB. Brasília, 1987.

SHANKAR, R. **Principles of Quantum Mechanics**. 2ª Ed., Springer, 1994;

SINGH, C. Students understanding of quantum mechanics at the beginning of graduate instruction. **American Journal of Physics**, Melville, v. 76, n.3, p. 277-287, 2008a.

SINGH, C. Transfer of Learning in Quantum Mechanics. Physics Education research Conference. **American Institute of Physics**, 2004.

SOUZA, V. C. A. & JUSTI, R. S. Produção e utilização de multimídia como recurso didático para o ensino do modelo atômico de Bohr – Uma experiência fundamentada na pesquisa educacional. In: **III Encontro Mineiro de Ensino de Química**. Viçosa, 2003.

TONOMURA, A. *et al.* Demonstration of Single-Electron Buildup of na Interference pattern. **American Journal of Physics**. v. 57, p. 117-120, 1989.

YOUNG, H. D. & FREEDMAN, R. A. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. 10ª edição. Pearson, São Paulo, 2004.

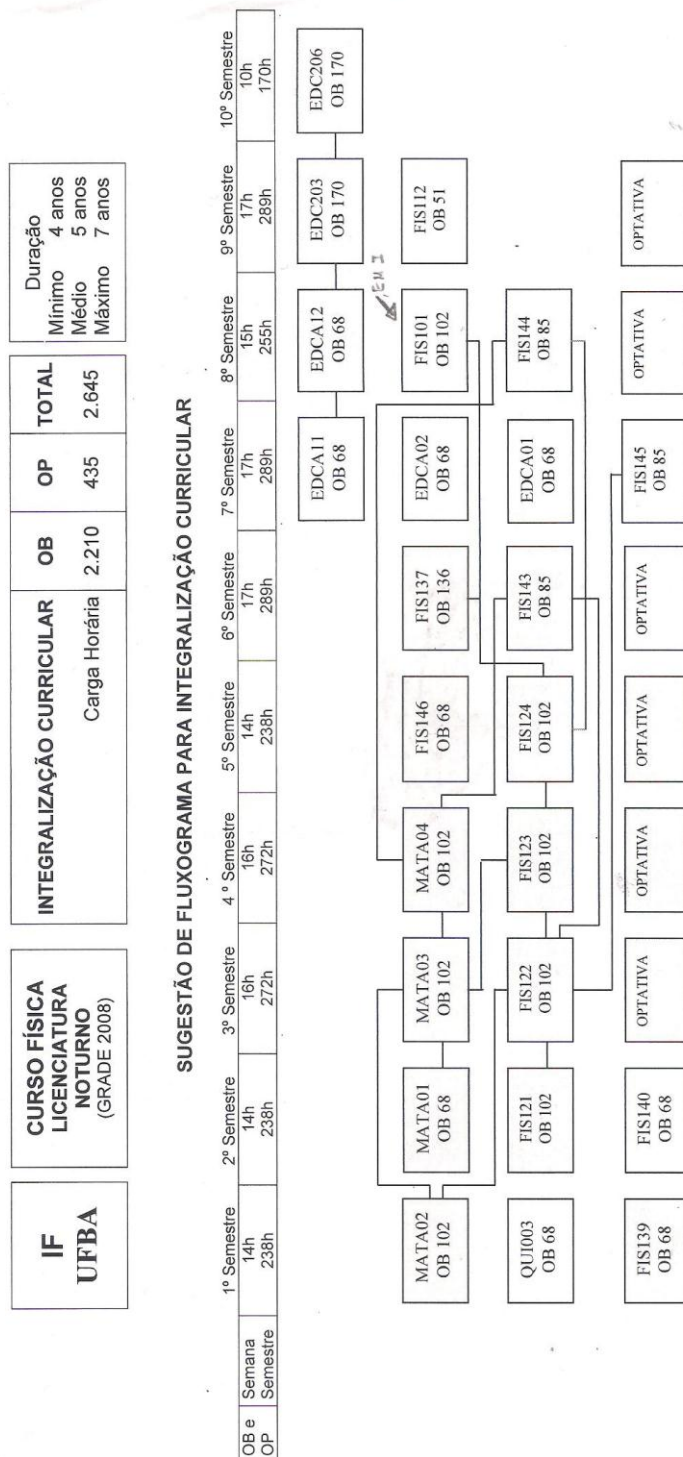
ZEILINGER, A *et al.* Quantum Interference Experiments with Large Molecules. **American Journal of Physics**. v.71, n.4, p. 319-325, 2003.

ANEXOS

ANEXO – 1

FLUXOGRAMA DO CURSO DE LIC. EM FÍSICA – UFBA – NOTURNO.

Noturno



- As disciplinas Complementares de Mecânica, de Termodinâmica e de Eletromagnetismo podem ser substituídas, respectivamente, por FIS 005-Mecânica Geral e Teórica I, FIS 007-Termodinâmica e FIS 107-Eletromagnetismo; a recíproca não é verdadeira. A disciplina Introdução à Física Matemática (OP) pode ser substituída por FIS 113-Métodos de Física Teórica I; a recíproca também não é verdadeira.
- O aluno deverá cumprir 435 horas em disciplinas optativas, 90 horas das quais podem ser cumpridas como atividades de formação complementar (abertas)

ANEXO 2 - CURRÍCULO E PERFIL DO LICENCIANDO EM FÍSICA – UFBA.

CURRÍCULO DO CURSO DE FÍSICA – LICENCIATURA

Base Legal – Parecer nº 296, aprovação em 17/11/62 em resolução anexa do C.F.E.

PERFIL DO LICENCIADO –

Este profissional é formado para trabalhar essencialmente no ensino e por isso requer conhecimento sólido e atualizado em Física, em Matemática e adequado treinamento na área pedagógica. Trata-se de uma profissão cuja carência se faz sentir em todos os níveis de ensino e na pesquisa da área educacional, numa sociedade que utiliza cada vez mais os produtos e insumos da pesquisa e da tecnologia.

ELENCO DE DISCIPLINAS

Disciplinas do Currículo Mínimo (CM)

Código	Nome	CH (T. P. E.)	Pré-requisito
FIS 005	Mecânica Geral e Teórica I	102 (68.34.00)	FIS126, MATA04
FIS 006	Mecânica Geral e Teórica II	102 (68.34.00)	FIS005
FIS 007	Termodinâmica	68 (34.34.00)	FIS126, MATA03
FIS 101	Estrutura da Matéria I	102 (51.51.00)	QUI003, FIS128
FIS 102	Estrutura da Matéria II	102 (51.51.00)	FIS101
FIS 125	Física Geral Experimental I F	170 (68.102.00)	Não tem
FIS 126	Física Geral Experimental II F	170 (68.102.00)	FIS125, MATA 02
FIS 127	Física Geral Experimental III F	170 (68.102.00)	MATA03, FIS126
FIS 128	Física Geral Experimental IV F	170 (68.102.00)	MATA04, FIS127
FIS137	Projetos e Modelos	136 (34.102.00)	FIS128
MATA01	Geometria Analítica	68 (34.34.00)	Não tem
MATA07	Álgebra Linear A	68 (34.34.00)	MATA01
MATA03	Cálculo B	102 (51.51.00)	MATA01, MATA02
MATA04	Cálculo C	102 (51.51.00)	MATA03
MAT045	Processamento de Dados	68 (34.34.00)	MATA07, MAT045/ MATA04
MAT174	Cálculo Numérico I	102 (68.34.00)	Não tem
MATA02	Cálculo A	68 (34.34.00)	Não tem
QUI 003	Química	51 (51.00.00)	QUI003
QUI 006	Química Orgânica I	68 (34.34.00)	Não tem
EDCA01	Fundam. Psicológicos da Educação	68 (34.34.00)	Não tem
EDCA02	Organização da Educação Brasileira	136 (51.68.51)	EDCA 01
EDC140	Didática I	170 (51.68.51)	EDC140, FIS137
EDC203	Metodologia e Prática de Ensino I	170 (51.68.51)	EDC140, FIS137
EDC206	Metodologia e Prática de Ensino II	170 (51.68.51)	EDC203

Disciplinas Complementares Optativas (OP) Opções na área de atuação dentre as listadas:

Código	Nome	CH (T. P. E.)	Pré-requisito
COM 364	Comunicação e Informática	68 (34.34.00)	Não tem
EDC 142	Técnicas e Recursos Audiovisuais	119 (51.68.00)	Não tem
EDCA05	História da Educação Brasileira	68 (51.00.00)	Não tem
EDC 266	Introdução à Informática na Educação	102 (51.51.00)	Não tem
EDC 274	História da Educação I *	68 (34.34.00)	Não tem
EDC 276	Filosofia da Educação I *	68 (34.34.00)	Não tem
EDC 278	Sociologia da Educação I *	68 (34.34.00)	Não tem
EDC 283	Curriculos *	68 (68.00.00)	Não tem
EDC 286	Avaliação da Aprendizagem *	68 (34.34.00)	Não tem
FIS 100	Introdução à Mecânica Estatística	85 (51.34.00)	FIS007, FIS101
FIS103	Introdução à Mecânica Quântica	85 (34.51.00)	FIS006/ FIS113/ FIS102
FIS 104	Introdução à Física do Estado Sólido	68 (34.34.00)	FIS102/ MAT007
FIS 105	Relatividade Restrita	68 (34.34.00)	FIS 128
FIS 107	Eletromagnetismo I	102 (68.34.00)	FIS128/ MAT007
FIS 108	Eletromagnetismo II	102 (68.34.00)	FIS107
FIS 109	Eletônica I	102 (34.68.00)	FIS128/ MAT007
FIS 110	Eletônica II	102 (34.68.00)	FIS 109
FIS 111	Introdução à Física Nuclear	102 (34.68.00)	FIS 102
FIS 112	Evolução da Física	51 (51.00.00)	Não tem
FIS 113	Métodos de Física Teórica I	102 (68.34.00)	FIS 128/ MAT 007
FIS 115	Tópicos do Ensino de Física	68 (34.34.00)	Cond. espec. de pré-requisito
FIS 116	Tópicos de Física Moderna	68 (34.34.00)	Cond. espec. de pré-requisito
FIS 117	Tópicos de Física Clássica	68 (34.34.00)	Cond. espec. de pré-requisito
FIS 119	Óptica	68 (34.34.00)	FIS107
FIS 120	Física e Sociedade	68 (34.34.00)	Não tem
FIS129	Introdução à Eletrônica Quântica	68 (34.34.00)	FIS102
FIS 133	Física do Meio Ambiente	68 (34.34.00)	FIS128
FIS 138	Introdução à Física da Terra Sólida	68 (34.34.00)	FIS 127/ GEO 202
FIS 144	Complementos de Eletromagnetismo	85 (51.34.00)	FIS 128/ MAT A04
FIS 146	Informática Aplicada à Física	68 (34.34.00)	Não tem
FIS 148	Introdução à Física Matemática	85 (51.34.00)	MATA04
FISA 01	Introdução à Astronomia	68 (34.34.00)	Não tem
FISA83	Introdução à Física Atômica e Molecular	68 (51.17.00)	FIS 101
GEO 004	Geologia Geral I	102 (51.51.00)	Não tem
GEO 005	Geologia Geral II	102 (51.51.00)	GEO004
GEO 199	Geofísica I-A	85 (51.34.00)	FIS127
GEO 202	Geologia Física	102 (51.51.00)	Não tem
MATA05	Cálculo D	102 (51.51.00)	MATA03
MAT018	Álgebra Linear II	68 (34.34.00)	MATA 07
MAT025	Estatística III-A	68 (34.34.00)	MATA03
MAT105	Funções Analíticas I	85 (51.34.00)	MATA03

ANEXO 3 - EMENTA E OBJETIVOS DA DISCIPLINA ESTRUTURA DA MATÉRIA I – UFBA.

Universidade Federal da Bahia

Instituto de Física

Departamento de Física do Estado Sólido

Campus Universitário de Ondina, CEP: 40.170-290, Salvador, Bahia, Brasil
☎ (071) 3283-6645 Fax: +55 71 3283-6606 E-mail: FIS2@ufba.br

Programa de Componente Curricular

Disciplina: FIS101 – Estrutura da Matéria I

Pré-requisitos: QUI003, FIS128 (ou FIS124)

C. Horária	Teórica	Prática	Total
Módulo	68	34	102
Ano	26	13	
Criada em 1972.2 e alterada a carga horária em 2004.1			

Ementa

Visa introduzir o aluno aos fenômenos microscópicos que possibilitem compreender e aceitar a formulação atômica da matéria e a natureza estatística dos efeitos macroscópicos observados. Uma série de dados experimentais apresentados e outros obtidos no laboratório pelo próprio estudante são analisados à luz da hipótese atômica. As bases fenomenológicas da teoria quântica são então introduzidas.

Objetivos

Ao término deste curso o aluno deverá conhecer a chamada "velha mecânica quântica", isto é, algumas das teorias e experimentos que precedem a atual mecânica quântica. Deverá também conhecer a equação de Schrödinger e fazer algumas aplicações.

Metodologia

Exposição e discussão em classe. Exercícios de fixação e estudo dirigido. Utilização de recursos áudio-visuais e de informática. Experimentos de laboratório. Experimentos demonstrativos. Seminários, debates, guias de estudo etc.

Bibliografia Principal

Parte Teórica:
EISBERG, R. M. Fundamentos da Física Moderna. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.
BREHM, J. J.; MULLIN, W. J. Introduction to the structure of matter. New York: John Wiley, 1989.
ROHLF, J. W. Modern Physics from α to z . New York: John Wiley, 1994.
DAVIES, P. (Editor). The new physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
LEITE LOPES, J. Introdução à teoria atômica da matéria. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965.
BORN, M. Física atômica. 4ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1971.
BEISER, A. Concepts de Física Moderna. México: Mc Graw-Hill, 1977.
WHER, M. R.; RICHARD, J. A. Física do átomo. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965.

Bibliografia Principal (cont.)

Parte Prática:
MELISSINOS, A. Experiments in Modern Physics. New York: Academic Press, 1973.
PORTIS, A. M.; YOUNG, H. D. Berkeley physics laboratory. Barcelona: Editorial Reverté S.A, 1974.
Textos de Laboratório de Estrutura da Matéria. Salvador: Instituto de Física da UFBA, 1999

Conteúdo Programático

Parte Teórica:

OK Radiação térmica e a origem da teoria quântica

Elétrons e fótons

OK Descoberta do núcleo atômico

OK O modelo de Bohr para a estrutura atômica

OK Dualidade onda-partícula

OK Equação de Schrödinger

Aplicações simples: poço e barreira de potencial, oscilador harmônico

O átomo de hidrogênio

Parte Prática:

Radiação do corpo negro

Efeito fotoelétrico – determinação da constante de Planck

Células fotoemissoras – estudo da corrente fotoelétrica

Espectrômetro. Série de Balmer – determinação da constante de Rydberg

Fotocondutores: CdS, CdSe

Termistores – determinação de características

Medidas de campos magnéticos

Efeito Faraday

Efeito Hall

ANEXO 4 - FLUXOGRAMA DA LIC. EM FÍSICA – UEPB - TURNO DIURNO

NÚCLEO COMUM

ATIVIDADES BÁSICAS

FÍSICA GERAL

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
111502	Física Básica I	132	Anual
111503	Física Básica II	132	Anual
111504	Física Básica III	132	Anual
111508	Laboratório de Física I	66	Anual
111509	Laboratório de Física II	66	Anual
111510	Laboratório de Física III	66	Anual
TOTAL		594	

MATEMÁTICA

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
110514	Cálculo Diferencial e Integral I	132	Anual
110515	Cálculo Diferencial e Integral II	132	Anual
110527	Equações Diferenciais Ordinárias	66	Semestral
110528	Geometria Analítica e Cálculo Vetorial	66	Semestral
110510	Probabilidade e Estatística	66	Semestral
110513	Computação Aplicada à Ciência	66	Anual
TOTAL		528	

FÍSICA CLÁSSICA, MODERNA e CONTEMPORÂNEA

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
111511	Mecânica Clássica	66	Semestral
111501	Eletromagnetismo	66	Semestral

111518	Termodinâmica	66	Semestral
111523	Mecânica Quântica	66	Semestral
111506	Física Moderna	132	Anual
TOTAL		396	

TRABALHO MONOGRÁFICO

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
111519	Trabalho Acadêmico Orientado	33	Semestral

ATIVIDADES COMPLEMENTARES

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
112517	Química Geral	132	Anual
111507	História da Física	66	Anual
304552	Metodologia Científica	66	Anual
111513	Introdução à Pesquisa em Física	33	Semestral
TOTAL		297	

OBS.: O componente curricular Química Geral é considerado atividade complementar, como sugere as Diretrizes Curriculares para os Cursos de Física.

NÚCLEO ESPECÍFICO

FORMAÇÃO PEDAGÓGICA

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
304500	Organização do Trab. na Escola e o Currículo	66	Anual
304524	Processo Didático: Planejamento e Avaliação	66	Anual
304531	Psicologia, Desenvolvimento e Aprendizagem	66	Anual
304555	Filosofia, Sociologia e Educação	66	Anual
111514	Prática Pedagógica em Física I	66	Anual

111515	Prática Pedagógica em Física II	66	Anual
111516	Prática Pedagógica em Física III	66	Anual
111517	Prática Pedagógica em Física IV	132	Anual
TOTAL		594	

ATIVIDADES ELETIVAS

CÓDIGO	ATIVIDADES/DISCIPLINAS	Carga Horária	Distribuição
111505	Física Matemática	66	Semestral
111512	Óptica geométrica	66	Semestral
111520	Instrumentalização p/ o Ensino de Ciências	66	Anual
111521	Instrumentalização p/ o Ensino de Física	66	Anual
111522	Fundamentos de Astronomia	66	Semestral
111524	Informática no Ensino de Ciências e Física	66	Semestral
111525	Física e meio ambiente	66	Semestral
111529	Tópicos especiais em Física	66	Semestral

Conforme estabelece a RESOLUÇÃO/UEPB/CONSEPE/04/99, a carga horária de atividades institucionais de Iniciação Científica e/ou Extensão poderão ser convertidas em “dispensa de atividades eletivas”.

Quanto a distribuição, o currículo do Curso de Licenciatura Plena em Física terá 75% de atividades anuais (30) e 25% de atividades semestrais (10), sendo assim composto:

Atividades	Carga Horária (h)	Percentuais
Básicas	1551	57,3%
Complementares	297	11,0%
Formação Pedagógica	594	22,0%
Eletivas	264	9,8%
Totais	2706	100,0%

ANEXO 5 - EMENTA DA DISCIPLINA DE MECÂNICA QUÂNTICA - UEPB



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

Componente Curricular:	<i>Mecânica Quântica</i>			Código:	111523
Carga Horária total:	66 horas	Série:	Quarta (Diurno) e Quinta (Noturno)	Oferta:	Semestral
Professor:				Ano:	

EMENTA:

Equações de Onda de Schrodinger: Autofunções e Autovalores; Potenciais Unidimensionais; A Estrutura Geral da Mecânica Quântica; Métodos de Operadores em Mecânica Quântica; Equação de Schrodinger em Três Dimensões; Momento Angular; A Equação Radial; O Átomo de Hidrogênio.

OBJETIVOS DO CURSO:

Objetivo geral:

Pretende-se que ao final do curso o aluno seja capaz de escrever a equação de Schrodinger dependente e independente do tempo para o problema de poço quadrado infinito e discutir como aparece a quantização de energia, seja capaz de discutir o significado dos termos: número quântico, estado fundamental, estado estacionário, valor esperado, elemento de matriz, regra de seleção de generecência e princípio de exclusão. Também seja capaz de discutir as similares e diferenças entre o modelo de Bohr e o tratamento da equação de Schrodinger para o átomo de hidrogênio.

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

I Unidade Temática

A equação de onda de Schrödinger.

A equação da partícula livre. A interpretação probabilística. A conservação de fluxo. Valores esperados. O operador momento. A realidade dos valores esperados. A equação de uma partícula em um potencial.

Auto funções e Autovalores

A equação de autovalores da energia. A partícula em uma caixa: Autofunções e Autovalores: Ortogonalidade de autofunções; O postulado de expansão e a interpretação dos coeficientes de expansão. Paridade. Autofunções do momento; estados não-normalizáveis; degenerescência e autofunções simultâneas.

Potência Unidimensionais

O potencial degrau; coeficientes de reflexão e de transmissão. O poço de potencial e estados ligados. A barreira de potencial; tunelamento; emissão fria; tunelamento através de películas finas; decaimento alfa. Modelos unidimensionais de moléculas e o potencial função-delta . O modelo de Kronig –penney. O oscilador harmônico.

A estrutura geral da Mecânica Quântica.

Autofunções e o teorema de expansão; analogia com espaços vetoriais. Operadores lineares; Operadores Hermitianos; completeza; degenerescência; conjuntos completos de observáveis que comutam. As relações de incerteza. O limite clássico da Teoria Quântica.

Métodos de Operadores em Mecânica Quântica.

O problema de oscilador harmônico; levantamento e abaixamento de operadores; auto-estados e autovalores. A interpretação da função de onda como amplitude de probabilidade. O desenvolvimento temporal de um sistema em termos de operadores; as descrições de Schrödinger e de Heisemberg.

II Unidade Temática

A equação de Schrödinger em Três Dimensões.

Separação do movimento do centro de massa; invariância por rotações; a separação do momento angular. A equação radial. A energia de Fermi para a caixa tridimensional.

Momento angular

A expressão de L^2 ; método algébrico de resolver o problema de autovalores de L_z e de L^2 ; De levantamento e de abaixamento; funções de Legendre.

A equação radial

Comportamento na origem; comportamento para r grande. A partícula livre; funções de Bessel esférica; ondas esféricas incidentes e emergentes; deslocamentos de fase. O poço quadrado: estados líquidos; poços profundos; estrutura de camadas; soluções do contínuo.

O Átomo de Hidrogênio

Simplificação da equação radial. Números quânticos; degenerescência. Funções de onda e relações com as ‘órbitas’.

METODOLOGIA:

O processo de ensino-aprendizagem da Mecânica Quântica dar-se-á utilizando-se de expressão oral sobre os assuntos do programa, abordagens teóricas, demonstrativas, com distribuição de listas de exercícios e resolução de exercícios em sala de aula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

GASIOROWICZ, S.; 1979. *Física Quântica*. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

EISBERG, R. e RESNICK, R. 1988. *Física Quântica*. Ed. Campos. Rio de Janeiro.

ANEXO 6 – EMENTA DA DISCIPLINA DE FÍSICA MODERNA – UEPB.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA

Componente Curricular:	Física Moderna			Código:	111506
Carga Horária total:	132 horas	Série :	Quarta Série (Diurno e Noturno)	Oferta:	Anual
Professor:				Ano:	

EMENTA:

A Quantização da Eletricidade, da Luz e da Energia. Dualidade Onda-Partícula. Postulados de De Broglie. A versão de Schrödinger da Mecânica Quântica. Soluções da Equação de Schrödinger: partícula livre, poços de potenciais e o oscilador harmônico simples. O Átomo de Hidrogênio. Física Nuclear: Modelos nucleares, decaimento nuclear e reações nucleares. Partículas Elementares.

OBJETIVOS:

Objetivos Gerais:

- Apresentar de forma propedêutica, os conhecimentos sobre Teoria da Relatividade e Teoria Quântica e como estes conhecimentos, elementos constituintes da Física Moderna, impulsionaram o conhecimento acerca da Ciência e da Tecnologia do século XX e modificaram a vida do homem moderno.
- Apresentar o corpo fenomenológico e matemático para solucionar e prever vários problemas do ponto de vista da Física Moderna.

Objetivos Específicos:

- Capacitar o aluno para abstrair, do ponto de vista físico e matemático, as novas concepções que este conhecimento comporta frente aos conhecimentos de Física Clássica, amplamente discutido.
- Discutir formas metodológicas para a introdução do conhecimento de Física Moderna no Ensino Médio.
- Criar uma nova visão para interpretação dos diversos fenômenos da natureza.
- Capacitar matematicamente, o aluno, para solucionar problemas físicos nas áreas de Física Relativística, Física Quântica e Física de Partículas.

- Mostrar as falhas apresentadas pela Física Clássica e o necessário surgimento da Física Moderna.

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO:

I Unidade temática:

1. Introdução:

- 1.1 O que é Física Moderna?
- 1.2 Apresentação do curso de Física moderna.

2. Radiação térmica e a origem da teoria quântica:

- 3.1. Radiação eletromagnética de cargas aceleradas
- 3.2. Emissão e absorção de radiação por superfícies
- 3.3. Radiação do corpo negro
- 3.4. A lei de Wien
- 3.5. A teoria de Rayleigh- Jeans
- 3.6. A distribuição de probabilidades de Boltzmann
- 3.7. A teoria de Planck
- 3.8. Comentários sobre o postulado de Planck

4. Elétrons e quantas

- 4.1. A razão e/m para os elétrons
- 4.2. A carga e a massa dos elétrons
- 4.3. A experiência de Bucherer
- 4.4. Efeito fotoelétrico (com experimento)
- 4.5. A teoria clássica e a teoria quântica do efeito fotoelétrico
- 4.6. O efeito Compton

5. A descoberta do núcleo atômico:

- 5.1. Modelo de Thomson para o átomo
- 5.2. Espalhamento de partículas alfa
- 5.3. Predições do modelo de Thomson
- 5.4. Comparações com a experiência
- 5.5. O modelo de Rutheford para o átomo
- 5.6. Verificação experimental e a determinação de Z
- 5.7. O tamanho do núcleo

6. A teoria de Bohr para a estrutura atômica:

- 6.1. O espectro atômico
- 6.2. Os postulados de Bohr
- 6.3. A teoria de Bohr do átomo de um elétron
- 6.4.. Correção para a massa nuclear finita
- 6.5. Estados de energia do átomo
- 6.6. As regras de quantização de Wilson- Sommerfeld
- 6.7. A teoria relativística de Sommerfeld
- 6.8. O princípio da correspondência

II Unidade temática:

7. Partículas e ondas:

- 7.1. Os postulados de de Broglie
- 7.2. Algumas propriedades das ondas piloto
- 7.3. Confirmação experimental dos postulados de de Broglie.
- 7.4. Interpretação da regra de quantificação de Bohr
- 7.5. O princípio da incerteza

8. Versão de Schrödinger da Mecânica Quântica:

- 8.1. A equação de Schrödinger
- 8.2. Interpretação da função de onda
- 8.3. A equação de Schrödinger independente do tempo
- 8.4. Quantização da energia na teoria de Schrödinger
- 8.5. Propriedades matemáticas da função de onda e auto funções
- 8.6. Teoria clássica de ondas transversais numa corda esticada
- 8.7. Valores esperados e operadores diferenciais
- 8.8. O limite clássico da mecânica quântica

9. Soluções da equação de Schrödinger:

- 9.1. A partícula livre
- 9.2. Potenciais do tipo degrau
- 9.3. Barreiras de potencial
- 9.4. Poços de potenciais

9.5. Oscilador harmônico simples

III Unidade temática

3. Teoria da Relatividade:

- 2.1. A transformação de Galileu e a mecânica clássica
- 2.2. A transformação de Galileu e a teoria eletromagnética
- 2.3. A experiência de Michelson – Morley
- 2.4. Os postulados de Einstein
- 2.5. Simultaneidade
- 2.6. Efeitos cinemáticos da relatividade
- 2.7. A transformação de Lorentz
- 2.8. Transformação de velocidade
- 2.9. Mecânica relativística
- 2.10. Transformação do momento e da energia
- 2.11. Verificação experimental da teoria

IV Unidade temática

10. Física nuclear:

- 11.1 A descoberta do nêutron
- 11.2 Propriedades dos núcleos no estado fundamental
- 11.3 Radioatividade
- 11.4 Reações nucleares
- 11.5 Fissão, Fusão e reatores nucleares
- 11.6 Interações de partículas com a matéria
- 11.7 A detecção de partículas

11. Partículas elementares:

- 12.1 O pósitron e outras antipartículas
- 12.2 A descoberta do neutrino
- 12.3 Os mésons
- 12.4 Partículas ressonantes

METODOLOGIA:

Partindo-se de algumas situações - problema, utilizar-se-á, como instrumentos metodológicos, aulas expositivas, seminários, vídeos, leitura de textos científicos e de divulgação científica, bem como construção de experimentos, visitas a laboratórios e discussões em grupo, para construir o corpo básico de conhecimentos sobre Física Moderna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. BARBOSA, A. F. **Técnicas de detecção**. Rio de Janeiro –RJ. CBPF. 1998. (apostila)
2. BEISER, A. **Concepts of Modern Physics: 5^a ed.** New York – USA. McGraw Hill. 1995. 534p.
3. BORN, M. **Física atômica**. 4^a ed. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian.
4. CONSTANTINI, F.J. **Introdução à física Moderna**. Rio de Janeiro-RJ. Campus, 1981. 288p.
5. EISENBERG, R. e RESNICK, R. **Física Quântica**. 8^a ed. Rio de Janeiro-RJ. Campus. 1994. 928p.
6. EISENBERG²³, R. M. **Fundamentos da Física Moderna**. Rio de Janeiro–RJ. Guanabara Dois. 1979. 643p.
7. ENDLER, A. M. F. **Introdução à Física de Partículas**. Rio de Janeiro-RJ. 1998. 191p. (apostila).
8. GILBERT, A. **Origens históricas da Física Moderna: introdução abreviada**. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian.
9. LORENTZ, H. A., EINSTEIN, A. e MINKOWSKI, H. **O princípio da Relatividade, vol.I**. 4^a ed. Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian.
10. ORTOLI, S. e PHARABOD, J. P. **Introdução à Física quântica**. Lisboa, Portugal. 1986.
11. RUSSEL, B. **ABC, da relatividade**. 5^a ed. Rio de Janeiro-RJ. Zahar. 1985
12. SQUIRES, G.L. **Problems in quantum Mechanics with solutions**. Great Britain. 1995. 254p.
13. TIPLER²⁴, P. A. **Física Moderna**. Rio de Janeiro- RJ. 1981. 423p.

²³ Este livro é tomado como livro texto.

ANEXO 7 – PROVAS – UEPB

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
DISCIPLINA:
ALUNO (A):

PROFESSOR:

PRIMEIRA AVALIAÇÃO: I UNIDADE TEMÁTICA

$h \cdot \nu$ $\lambda = \frac{c}{\nu}$

1ª Questão (Valor 2,0)

A partir da Lei de Planck, demonstre (a) que a densidade total de energia de um corpo negro é proporcional a T^4 como afirma a lei de Stefan-Boltzmann (b) o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação emitida tem valor máximo varia inversamente com a temperatura.

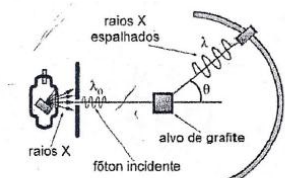
2ª Questão (Valor 1,5)

A partir da Lei de Planck em termos do comprimento de onda, expresse a mesma em termos da frequência.

3ª Questão (Valor 1,5)

O efeito Compton é o efeito no qual a radiação transfere para um elétron orbitário parte de sua energia e, mudando de direção a radiação emerge com menor energia.

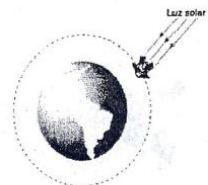
- (a) O efeito Compton é uma evidência da natureza corpuscular ou ondulatória da luz? Justifique sua resposta
(b) O que ocorre com o comprimento de onda do fóton emergente? Justifique sua resposta



Esquema do equipamento usado por Compton

4ª Questão (Valor 1,0)

Satélites artificiais orbitando a Terra podem ficar superficialmente eletrizados devido ao efeito fotoelétrico. Supondo que a superfície do satélite seja recoberta com uma camada de metal, com função trabalho 4,32 eV, determine o maior comprimento de onda de um fóton capaz de provocar emissão fotoelétrica nesse metal.



5ª Questão (Valor 2,0)

Descreva a experiência de Thomson. Determine a relação carga-massa do elétron através das deflexões sofridas pelo feixe de partículas.

Algumas constantes físicas

$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; $C = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$
 $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ e $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (ou $h = 4,135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$)

(A₁)

	UEPB - CCT – DEPARTAMENTO DE FÍSICA
	DISCIPLINA: MECÂNICA QUÂNTICA
	PROFESSOR: _____
	ALUNO(A): _____ MATR: _____
	DATA: 13 / 10 / 2010 .

PROVA: 5,1

LISTA: 2,0

NOTA: 7,1

1ª AVALIAÇÃO – UNIDADE I

- 1) (1 ponto) Considere um elétron em um átomo de hidrogênio. Medimos então a sua órbita com excelente precisão ($\Delta x \ll r_n - r_{n-1}$. - r_n é o raio da n -ésima órbita). Levando em conta o princípio da incerteza, o que podemos dizer sobre o momento do elétron?
- 2) (2 pontos) (a) Como podemos definir um operador Hermitiano? (b) Os operadores que representam quantidades físicas podem ser não-Hermitianos?
- 3) (3 pontos) Seja uma partícula de massa m confinada na região $-a/2 < x < a/2$. Estando esta partícula no estado de mais baixa energia (estado fundamental), a função de onda que a representa é:

$$u(x) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{a}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right), & -a/2 < x < a/2 \\ 0, & \text{outros valores de } x \end{cases}$$

- (a) Calcule a probabilidade de encontrar a partícula entre as posições $-a/2$ e 0 .
 - (b) Determine o valor médio de x e comente o resultado.
- 4) (2 pontos) Admitindo funções de onda de quadrado integrável, mostre que o operador d/dx não é Hermitiano.

A₅

10

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
DISCIPLINA: FÍSICA MODERNA PROFESSOR

ALUNO (A):

MAT.:

REPOSIÇÃO AVALIAÇÃO: II UNIDADE TEMÁTICA

1ª Questão (Valor 1,5)

(a) Deduza a expressão das energias e dos raios das órbitas para o átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr. (b) Este modelo vale para que tipos de átomos? Quais as mudanças que devem ser feitas na expressão obtida? Quais as condições que este modelo impõe para que haja a garantia de não haver o colapso do átomo (ou seja, para resolver os problemas enfrentados pelo modelo atômico de Rutherford)?

2ª Questão (Valor 1,0)

Assumindo as propriedades ondulatórias (Relações de "de Broglie") mostre que um elétron livre em movimento a velocidade de fase é diferente da velocidade do elétron, mas é igual à velocidade de grupo.

3ª Questão (Valor 1,0)

Dada a Equação de Schrodinger em uma dimensão $-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$. Determine a Equação de Schrodinger independente do tempo, usando para isso o método de separação de variáveis.

4ª Questão (Valor 1,5)

(a) (I) Determine o comprimento de onda de de Broglie para um (a) próton e (b) elétron de 30 keV.
(II) Qual o comprimento de onda de de Broglie para um elétron cuja velocidade é 9×10^7 m/s

5ª Questão (Valor 2,0)

(a) Determine a função de onda (solução da Equação de Shrodinger em uma dimensão) para o problema do poço quadrado infinito, ou seja, o problema da partícula presa em uma caixa. O poço tem largura $4L$. Considere que para $-2L < x < 2L$ a energia potencial $V(x)$ é nula. Obviamente, fora dessa região este é infinito. (b) Qual a probabilidade da partícula está entre $-L$ a $\frac{L}{2}$

UEPB



UEPB - CCT – DEPARTAMENTO DE FÍSICA

DISCIPLINA: MECÂNICA QUÂNTICA

PROFESSOR:

ALUNO(A): _____ MATR. _____

DATA: ____ / ____ / ____

2ª AVALIAÇÃO – UNIDADE I

- 1) (2 pontos) Do ponto de vista da mecânica quântica, quando poderemos afirmar que uma grandeza física é uma constante de movimento?
- 2) Uma partícula de massa m se desloca ao longo do eixo x , na presença do potencial

$$V(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < a \\ \infty, & \text{outros valores de } x \end{cases}$$

- (a) (2 pontos) Resolva a equação estacionária de Schrödinger.
 - (b) (2 pontos) Estando a partícula em um estado descrito pela função $\psi = Ax(a-x)$, normalize-a e determine a probabilidade de que uma medida da energia nos forneça o valor E_0 (energia do estado fundamental).
- 3) (2 pontos) Admitindo que a função $f(\phi)$ satisfaz a condição $f(\phi) = f(\phi + 2\pi)$ e que

$$\int_0^{2\pi} |f(\phi)|^2 d\phi = 1,$$

resolva a equação de autovalores: $\frac{\hbar}{i} \frac{d}{d\phi} f(\phi) = \alpha f(\phi)$.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
DISCIPLINA: FÍSICA MODERNA
ALUNO (A):

MAT.:

ANO: 2010

AVALIAÇÃO INDIVIDUAL: II UNIDADE TEMÁTICA

OBSERVAÇÃO: ESCOLHA QUATRO QUESTÕES

1ª Questão (Valor 1,5)

(a) Deduza a expressão das energias e dos raios das órbitas para o átomo de hidrogênio segundo o modelo de Bohr. (b) Este modelo vale para que tipos de átomos? Quais as mudanças que devem ser feitas na expressão obtida.

2ª Questão (Valor 1,5)

Assumindo as propriedades ondulatórias (Relações de "de Broglie") mostre que um elétron livre em movimento a velocidade de fase é diferente da velocidade do elétron, mas é igual à velocidade de grupo.

3ª Questão (Valor 1,5)

Quais as relações matemáticas do princípio da indeterminação formulado por Heisenberg. Relate sobre o limite inferior desta relação.

4ª Questão (Valor 1,5)

Fale sobre o dualismo onda-partícula. Use o experimento de dupla fenda para mostrar esse comportamento.

5ª Questão (Valor 1,5)

Dada a Equação de Schrodinger em uma dimensão $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$. Determine a Equação de Schrodinger independente do tempo, usando para isso o método de separação de variáveis.

6ª Questão (Valor 1,5)

(a) Qual é o comprimento de onda de um corpo de 1g que se move com uma velocidade de 1m por ano? $\lambda = \frac{h}{p}$
(b) Qual deveria ser a velocidade do corpo para que o comprimento de onda fosse igual a 1 cm? $\lambda = \frac{h}{p}$
(c) Determinam-se simultaneamente a posição e o momento de um elétron de 4 keV. Se a posição estiver localizada em um intervalo de 1,2 Å, qual é a percentagem na incerteza do seu momento

7ª Questão (Valor 1,5)

Mostre que a função de onda $\Psi(x,t) = Ae^{(kx - \omega t)}$ não satisfaz e que a função de onda $\Psi(x,t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$ satisfaz a Equação de Shrodinger dependente do tempo.

8ª Questão (Valor 1,5)

Determine a função de onda (solução da Equação de Shrodinger em uma dimensão) para o problema do poço quadrado infinito, ou seja, o problema da partícula presa em uma caixa. O poço tem largura L. Considere que para $0 < x < L$ o potencial $V(x)$ é nulo. Obviamente, fora dessa região este é infinito.

9ª Questão (Valor 1,5)

Através do fenômeno de "batimento" obter as relações clássicas de indeterminação.

Observação: Marque na Capa da avaliação com Círculos as questões escolhidas.

ANEXO 8 - ROTEIRO DA ENTREVISTA – PROFESSOR

1. QUAL O OBJETIVO DA SUA DISCIPLINA?
2. O QUE ESPERA QUE OS ESTUDANTES APRENDAM?
3. QUAIS SÃO OS CONCEITOS MAIS IMPORTANTES?
4. POR QUE ESSES CONCEITOS SÃO IMPORTANTES PARA OS LICENCIANDOS?
5. QUAL O LIVRO VOCÊ ACHA MAIS INTERESSANTE PARA ESSA DISCIPLINA? POR QUÊ?
6. O QUE VOCÊ ACHA QUE OS ALUNOS ENTENDEM? OU O QUE VOCÊ ACHA QUE DE FATO OS ALUNOS APRENDEM NESTA DISCIPLINA?
7. MODIFICARIA ALGUMA COISA DA DISCIPLINA OU NA EMENTA?

ANEXO 9 - ROTEIRO DA ENTREVISTA – ALUNO

1. COMO VOCÊ VIVENCIOU A DISCIPLINA?
2. PARA VOCÊ QUAIS SÃO OS CONCEITOS CENTRAIS?
3. O QUE SIGNIFICA ESSES CONCEITOS CENTRAIS?
4. QUAIS SUAS DIFICULDADES EM TERMOS DE CONCEITOS E DE RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS?
5. O QUE VOCÊ ENTENDE POR ESTADO QUÂNTICO?
6. VOCÊ ACHA QUE PODERIA ABORDAR CONTEÚDOS DE FÍSICA MODERNA, RELACIONADOS COM A MQ, NO ENSINO MÉDIO?
7. QUAIS ASSUNTOS VOCÊ ABORDARIA NO ENSINO MÉDIO?
8. COMO VOCÊ ABORDARIA ESSES ASSUNTOS? POR QUÊ?