



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE
CENTRO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

JANIEL CELIO DOS SANTOS

**Análise das concepções quânticas dos alunos do
curso de licenciatura em Física após o uso de
experimentos virtuais**

CAMPINA GRANDE – PB
2014

JANIEL CELIO DOS SANTOS

**Análise das concepções quânticas dos alunos do
curso de licenciatura em Física após o uso de
experimentos virtuais**

Monografia apresentada ao Curso de
Licenciatura Plena em Física da Universidade
Estadual da Paraíba, em cumprimento à
exigência para obtenção do grau de graduado.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros

CAMPINA GRANDE – PB
2014

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

S237a Santos, Janiel Celio dos.

Análise das concepções quânticas dos alunos do curso de licenciatura em física após o uso de experimentos virtuais [manuscrito] / Janiel Celio dos Santos. - 2014.
44 p. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Marcos Antônio Barros, Departamento de Física".

1. Ensino de física. 2. Formação do professor. 3. Concepções quânticas. 4. Mecânica quântica. I. Título.

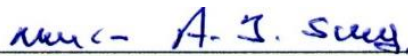
21. ed. CDD 530.7


JANIEL CELIO DOS SANTOS

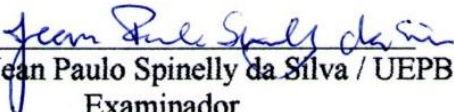
Análise das concepções quânticas dos alunos do curso de licenciatura em Física após o uso de experimentos virtuais

Monografia apresentada ao Curso de Licenciatura Plena em Física da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de graduando.

Aprovada em 29/10/2014.


Prof. Dr. Marcos Antônio Barros / UEPB
Orientador


Prof. Dr. Aécio Ferreira de Lima / UAF/UFCG
Examinador


Prof. Dr. Jean Paulo Spinelly da Silva / UEPB
Examinador

Prof.^a Dr.^a Morgana Ligia de Farias Freire / UEPB
Examinadora (suplente)

/

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as pessoas que lutam diariamente ao meu lado, transmitindo fé, amor, alegria, determinação, paciência, e coragem, tornando os meus dias mais felizes e bonitos.

Em especial a minha família, na pessoa da minha esposa *Monaliza Rodrigues* que nunca me deixou desistir e aos meus filhos *Thomas Mizael* e em breve *Thiane Marina*.

“O amor é o único nexo permanente válido nas relações familiares. Amar e ser amado é um desejo de todos. E também um direito que a sociedade deveria proteger e estimular.” (Knobel, 1992).

AGRADECIMENTOS

Ao todo criador, Deus, que está acima de todas as coisas deste mundo. Concebendo sempre os nossos desejos e vontades, mesmo quando de forma silenciosa, mas no momento certo.

Aos meus pais *José Francisco* e *Francisca Célia* que muito se empenharam na minha caminhada e se orgulham por esta vitória, e aos meus irmãos *Daniel Bruno*, *Jucélio Sérgio* e *Francislaine Suelia*, pois sem vocês nada disso seria possível. Obrigado pelo apoio, carinho e compreensão.

Ao professor *Dr. Marcos Barros* pela confiança que o mesmo depositou em mim, na hora em que precisei, pelas leituras sugeridas ao longo dessa orientação e pela dedicação, para a conclusão deste trabalho.

A todos que fazem parte do departamento do Curso de Física, desta Universidade, que com empenho contribuíram ao longo deste curso para minha formação como licenciando em Física.

A todos os meus colegas de turma, que forma tantos que passaram, pelos momentos de estudos e diversão que foram necessários para a minha formação como cidadão e como profissional que me tornei.

Enfim, a minha família, *Monaliza Rodrigues*, *Thomas Mizael* e em breve *Thiane Marina*, que souberam entender a minha ausência nas horas mais fraternas.

“Se a Mecânica Quântica não te assustou, então você não a entendeu ainda.”

Niels Henrik David Bohr

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico vivenciado pela sociedade tem despertado grande interesse em professores e alunos pela Física Moderna e Contemporânea, já que muitas dessas tecnologias apenas podem ser explicadas por meios dos seus postulados. Estudos bibliográficos demonstram que há um escasso número de estudos e pesquisas relacionadas à formação inicial de professores de Física e a compreensão de alguns conceitos quânticos, refletindo diretamente no ensino dos fundamentos da Mecânica Quântica. Portanto, este trabalho tem por objetivo averiguar as possíveis mudanças de concepções quânticas, em futuros professores de Física, quando submetidos a uma oficina que faz uso experimentos virtuais relacionados à teoria quântica. Foram avaliados, 12 alunos do curso de licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, que participaram da oficina “O uso de experimentos para abordar conceitos de física quântica”, através de um pré e pós-teste. Os resultados deste estudo demonstram que houve uma mudança de concepção entre os alunos, em relação ao pré-teste, mas que estes resultados não são satisfatórios para uma turma de futuros professores de Física.

PALAVRA-CHAVE: licenciados em Física, concepções quânticas, dualidade onda-partícula

A B S T R A C T

The technological development survived by the society has been waking great interest in teachers and pupils for the Modern and Contemporary Physics, since a great deal of these technologies hardly can be explained by ways of his postulates. Bibliographical studies demonstrate that there is a scarce number of studies and inquiries made a list to the initial formation of teachers of Physics and the understanding of some quantum concepts, thinking straightly about the teaching of the bases of the Quantum Mechanics. So, this work has since objective checks the possible changes of quantum conceptions, in future teachers of Physics, when subjected to a workshop that does I use virtual experiments made a list to the quantum theory. They were valued, 12 pupils of the course of degree course in Physics of the State University of the Butch woman, who participated of the workshop “The experiments use to board concepts of quantum physics”, through a daily pay and powders-tests. The results of this study demonstrate that there was a conception change between the pupils, regarding the daily pay-test, but that these results are not satisfactory for a group of future teachers of Physics.

KEYWORDS: graduates in physics, quantum conceptions, wave-particle duality

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	Disposição das disciplinas de FMC dos alunos participantes	33
TABELA 2 –	Resultado do pré-teste	34
TABELA 3 –	Resultado do pós-teste	38

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 –	Esquema do IMZ	23
FIGURA 2 –	Visão superior do experimento do IMZ Virtual	25
FIGURA 3 –	IMZ Virtual em regime clássico	26
FIGURA 4 –	IMZ Virtual em Regime Quântico	27
FIGURA 5 –	Experimento da dupla fenda com elétrons individuais	28
FIGURA 6 –	Recortes instantâneos da chegada dos elétrons do experimento de dupla fenda. (a) 8 elétrons, (b) 270 elétrons, (c) 2000 elétrons (d) 160,000 elétrons. O tempo total exposição desde o início até a fase (d) é de 20min	29
FIGURA 7 –	Comparação das respostas do Pré-teste e Pós-teste	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	19
3.1 Fundamentos Quânticos	19
3.2 O Interferômetro de Mach-Zenhder	23
4. METODOLOGIA	29
4.1 Estrutura da Oficina	30
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	32
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAL BIBLIOGRÁFICO	41
APÊNDICE A – TESTE DE CONCEPÇÕES QUÂNTICAS	43

1. INTRODUÇÃO

O ensino da Física Moderna e Contemporânea (FMC), nos dias atuais, tem despertado um grande interesse por parte de professores e aluno, já que descreve e prediz uma variedade de fenômenos e pelos seus efeitos sobre as tecnologias modernas. Os conceitos relacionados à FMC buscam aproximar os alunos de seu cotidiano, uma vez que, o desenvolvimento da microeletrônica, da nanotecnologia e da computação quântica, gera dispositivos que só são entendidos através dos postulados e princípios da Física Quântica (FQ).

Entendemos que há um despertar natural para a compreensão de alguns fundamentos quânticos, uma vez que determinados conteúdos já fazem parte da vida das pessoas. Dessa forma, torna-se necessário tanto aos alunos de nível superior - como os de Física, de Química, de Biologia e das engenharias - 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 os postulados e princípios da FQ possam ser mais discutidos e mais elaborados, amenizando o formalismo abstrato, típico dessa disciplina e que tem gerado desinteresse para sua aprendizagem, por parte dos futuros professores do ensino médio, conforme têm nos revelado as literaturas (GERBASSI et al 2007; REZENDE Jr. e CRUZ, 2009).

Diante desse quadro, propusemos em nossa pesquisa a seguinte pergunta:

- Que tipo de concepções conceituais os licenciandos em Física da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) apresentam sobre alguns fenômenos quânticos?

Buscando responder a essa indagação, recorreremos à literatura (OSTERMANN e PEREIRA, 2009a; OSTERMANN e PEREIRA, 2009b; PEREIRA, 2008; OSTERMANN e RICCI, 2005; OSTERMANN, PRADO & RICCI, 2008; BARROS, 2006) que nos norteia para o ensino da FMC nos cursos de formação de professores, no qual se verificam diversas lacunas e inadequações, uma vez que há uma carência de discussões acerca dos aspectos conceituais e filosóficos relacionados à FQ, não atendendo as necessidades vivenciadas pelos alunos no seu cotidiano.

As pesquisas bibliográficas (HERSCOVITZ, MOREIRA e PANTOJA, 2011; PEREIRA e OSTERMANN, 2009; PEREIRA, 2008) demonstram que há um escasso número de estudos e pesquisas relacionadas à formação inicial de professores de Física e a compreensão

de alguns conceitos quânticos, refletindo diretamente nas pesquisas relacionadas às dificuldades de introdução dos fundamentos da FQ no ensino médio, justificada pela crescente utilização de novas tecnologias na sociedade em que vivemos. Assim sendo, nossa pesquisa tem como objetivo geral:

- Diagnosticar as possíveis mudanças de concepções quânticas, em licenciandos em Física, quando submetidos à utilização de experimentos virtuais relacionados à teoria quântica.

Além desse, nosso trabalho monográfico tem os seguintes objetivos específicos:

- Comparar as concepções apresentadas pelos alunos com as concepções obtidas na literatura;
- Propor, a partir da nossa fundamentação teórica, uma base conceitual e filosófica de alguns fundamentos quânticos.

Este trabalho é apresentado em seis capítulos. No capítulo I temos inicialmente a introdução deste seguido pela revisão de literatura, onde justificamos a nossa preocupação inicial recorrendo a informações consolidadas nas pesquisas ali apresentadas, denotando a preocupação com os aspectos conceituais, às vezes inadequados, apreendidos por alunos que cursam disciplinas relativas aos fundamentos da FQ. No terceiro capítulo, temos a fundamentação teórica, que se inicia com a exposição dos fundamentos da Teoria Quântica e suas interpretações, além do experimento virtual que analisa o fenômeno de interferência quântica, aqui chamado de Interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ).

No quarto capítulo temos a nossa metodologia, na qual propomos uma abordagem qualiquantitativa, descrevendo como se dá o processo de formação de concepções adquiridas e construídas, tendo como ferramenta de coleta de dados os questionários de pré e pós-testes. No quinto capítulo temos a análise e discussão dos dados, norteados para uma assimilação mais significativa dos conceitos trabalhados durante a oficina. Por último, nossas conclusões apontam que a utilização de oficinas é relevante, no sentido de dinamizar o processo ensino-aprendizagem de conteúdos tidos como de difícil assimilação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Considerando que nosso trabalho trata da formação de licenciandos em Física associada a fundamentos de FQ, cabe, neste capítulo, fazermos uma revisão nos trabalhos de Herscovitz, Moreira e Pantoja (2011), Greca e Freire Jr (2012) e Pereira e Ostermann (2009), que realizaram uma densa revisão de trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sobre o ensino de FMC. 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 FQ, e seus resultados de aprendizagem.

Herscovitz, Moreira e Pantoja (2011), no intuito de complementar as revisões literárias anteriores (OSTERMANN e MOREIRA, 2000; GRECA e MOREIRA, 2001), apresentam o panorama das pesquisas em ensino de Mecânica Quântica (MQ), cujos trabalhos foram publicados em revistas de Ensino de Física e/ou Ciências, durante o período de 1999 a 2009, segundo a classificação do *qualis* da CAPES, totalizando 60 artigos. Segundo esses autores, verificou-se um aumento progressivo no número de publicações de trabalhos na área, de um artigo em 1999 para 15 artigos em 2009, um número pouco expressivo para dez anos, mas com expectativas de crescimento.

Recentemente, Greca e Freire Jr. (2012) pesquisaram 32 artigos publicados no período de 2000 a 2011, sobre o ensino de FQ, em nível médio e superior. Nesse contexto, foram analisadas oito revistas, com o objetivo de averiguar o que as novas propostas para o ensino de FQ, 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.

Pereira e Ostermann (2009) promoveram uma revisão de 102 artigos sobre o ensino de FMC e MQ publicados nas mais importantes revistas de ensino de ciências em nível nacional e internacional, no período de 2001 a 2006. Os autores classificaram os artigos em quatro grandes grupos, a saber:

- (i). Propostas testadas em sala de aula que apresentem resultados de aprendizagem;
- (ii). Levantamento de concepções acerca de tópicos de FMC;

- (iii). Bibliografia de consulta para professores;
- (iv). Análise de publicações relacionadas ao ensino de FMC.

Verificou-se que 52 trabalhos foram classificados no grupo (iii), enquanto que os 50 trabalhos restantes foram distribuídos nos demais grupos, como resultados de pesquisas. Eles ainda salientam sobre a escassez de estudos sobre a formação inicial e continuada de professores, que reflete diretamente na dificuldade da inserção desse conteúdo no ensino médio, que apresentou apenas sete trabalhos, representando 6,9% da amostra total. Dentre esses artigos publicados e com resultados de pesquisa, separamos alguns para uma breve discussão, já que eles abordam o mesmo contexto da nossa pesquisa.

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 de Licenciatura em Física. A pesquisa foi realizada na Universidade de Kiel na Alemanha, envolvendo 13 alunos que já tinham tido contato, em outra disciplina específica, com a FQ. 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 FQ.

Nessa mesma linha de pesquisa, Ostermann e 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. Vários aspectos, na maioria dos resultados, apontam para lacunas importantes nos aspectos conceituais básicos da MQ, que culminou na formulação de uma unidade conceitual, destinada aos professores participantes do mestrado profissionalizante, que rompesse com a forma tradicional como são ministrados assuntos desse porte, na graduação e pós-graduação, em detrimento dos aspectos essencialmente quânticos.

Ostermann & Ricci (2005) relatam a reestruturação e implementação de uma unidade didática conceitual sobre FQ na disciplina “Tópicos de Física Moderna e Contemporânea I” em

uma turma do Mestrado Profissional em Ensino de Física da UFRGS. 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 FQ, sem a preocupação excessiva com o formalismo matemático. O desenvolvimento da unidade centrou-se no uso de novas tecnologias (softwares livres do tipo “bancada virtual”) para o aprendizado significativo de conceitos centrais da FQ, promovendo mudanças nas concepções dos alunos-professores, principalmente as que se referem às diferenças entre objetos clássicos e quânticos.

Em outro trabalho, Ostermann e Pereira (2009) investigaram as concepções prévias de 14 estudantes do sétimo período do Curso de Licenciatura em Física da UFRGS, que já haviam cursado duas disciplinas sobre FQ, 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 IMZ. 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 FQ na formação inicial de futuros professores, desenvolvida junto a uma disciplina do Curso de Licenciatura em Física da UFRGS. Tomando o conceito de dualidade onda partícula e a utilização de software que simula o IMZ para intervenção didática, o foco foi analisar 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 FQ com uso de instrumentos semióticos. Os resultados mostraram que as ações mediadas pelo uso do IMZ, 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.

Tomando como referência os trabalhos citados e nas 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 FQ, como: dificuldades na compreensão dos conceitos quânticos; uma forte ligação com os conceitos clássicos para

estudar assuntos estritamente quânticos; o uso marcante do formalismo matemático, inerente ao ensino MQ; e a falta de uso de tecnologias didáticas que reduzam a abstração dos conceitos e postulados quânticos (BARROS, 2006).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando os objetivos deste trabalho monográfico, cabe neste capítulo, fazermos um levantamento dos fundamentos teóricos, em relação a assuntos inerentes ao processo ensino da FQ, 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 FQ.

Um curso de licenciatura em Física que chame a atenção para esses problemas, contextualizando os desenvolvimentos que foram e são realizados pela FQ e incluindo dentro desse quadro aspectos sobre os debates em torno de suas interpretações e fundamentos, está, na ótica aqui adotada. Assim sendo, não daremos atenção aos eventos que originaram a FQ, 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 (PESSOA JR, 2003); O Universo dos Quanta (FREIRE JR. e CARVALHO NETO, 1997); The Feynman Lectures on Physics Vol. III (FEYNMAN, et al, 1963); The Quantum Challenge (GREENSTEIN e ZAJONC, 2005); Black Body Theory and the Quantum Discontinuity (1894-1912) (KHUN, 1987) e David Bohm e a controvérsia dos quantas (FREIRE JR, 1999). Que dão ênfases aos conceitos, às interpretações e às questões históricas e filosóficas da FQ. 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 Fundamentos Quânticos

As partículas clássicas podem ser pensadas como sendo pequenas esferas que se movem no espaço, com velocidade instantânea e trajetória definida. Por outro lado, as ondas clássicas são perturbações que se propagam em um meio, com um comportamento tipicamente ondulatório. Assumir que um objeto é ao mesmo tempo onda e partícula é uma contradição lógica, pois isto implicaria afirmar que algo é bem localizado no espaço e espalhado ao mesmo tempo. A teoria quântica precisa conciliar o comportamento de onda e partícula sem sustentar essa contradição.

Na introdução do livro “The Feynman Lectures on Physics”, volume III de Richard Feynman (FEYNMAN et al., 1963), há uma abordagem inicial sobre os conceitos da MQ e radiação, onde seguramente ele nos convida a entender o comportamento quântico, dizendo:

Neste capítulo vamos abordar de imediato o elemento básico do comportamento misterioso em sua forma mais estranha. Nós escolhemos para analisar um fenômeno que é impossível, absolutamente impossível, para explicar de alguma forma clássica, e que tem em si o coração da mecânica quântica. Na realidade, ele contém o único mistério. Nós não podemos fazer o mistério desaparecer por "explicar" como ele funciona. Vamos apenas dizer-lhe como ele funciona. Ao contar-lhe como ele funciona, vamos ter lhe contado sobre as peculiaridades básicas de toda mecânica quântica (FEYNMAN et al., 1963, p. 1)¹.

Este comportamento misterioso e peculiar citado por Feynman (1963) trata-se do comportamento dual da luz (onda-partícula), que traz consigo certa estranheza na sua compreensão, não só por parte dos estudantes, mas até mesmo pelos físicos mais experientes, que não o entende da maneira que gostariam. Esta dificuldade é até aceitável, já que toda a experiência direta da intuição humana se aplica a objetos grandes, e os objetos de estudo da FQ residem no mundo microscópico, que inclui os objetos atômicos (elétrons, prótons, nêutrons, fótons, e assim por diante). Com isso, para compreendermos a FQ precisamos aprender sobre eles em uma forma abstrata ou imaginativa e não pela conexão com a nossa experiência direta.

Mas, qual a essência da Teoria quântica (TQ)? Pessoa Jr. (2003, p 6), sugere que não existe uma resposta única, mas cita algumas como essenciais: o nome “*quântico*” sugere a presença de quantidades discretas ou pacotes de energia; a maior novidade da TQ seria a probabilidade ou o “indeterminismo”; o princípio da incerteza; a impossibilidade de separar o observador do objeto observado; ou mesmo com viés mais matemático com uso de grandezas que não comutam, ou o papel insubstituível desempenhado pelos números complexos. Qualquer uma dessas afirmações pode ser considerada como sendo a mais fundamental. Entretanto, como todos esses aspectos estão fortemente vinculados à dualidade onda-partícula, nós a assumimos em nossa abordagem, como sendo a essência da FQ.

¹ Tradução nossa.

Segundo Pessoa Jr. (2003), se tivéssemos de resumir qual a essência da FQ, e qual a maior diferença entre ela e a Física Clássica, as respostas seriam várias, mas de maneira essencial teríamos que,

A Teoria Quântica seria a teoria que atribui, para qualquer partícula individual, aspectos ondulatórios, e para qualquer forma de radiação, aspectos corpusculares. Esta é uma versão ‘geral’ da dualidade onda-partícula (2003, p. 1).

Como uma teoria científica não admite contradições em sua fundamentação, a Teoria Quântica busca conciliar o comportamento dual sem entrar em contradição, pois assumir que a luz é ao mesmo tempo onda e partícula, é o mesmo que dizer que ela segue uma trajetória definida e não definida. Para tal, temos dois enunciados diferentes para a dualidade onda-partícula: “*versão fraca*” que tenta conciliar interferência (ondulatória) com a detecção pontual de um quantum (corpúsculo) e a “*versão forte*” desenvolvida por Niels Bohr, que concerne a existência de interferência e de trajetórias (PESSOA JR., 2003, p. 4).

Diante desta versão “geral” e dos enunciados sugeridos, vemos na literatura que existem dezenas de interpretações postas à Teoria Quântica, que podem ser organizadas em quatro ou cinco grupos². De maneira simplificada, Pessoa Jr. (2003, p. 5-6) apresenta quatro tipos de interpretação simplificadas usadas para explicar a dualidade onda-partícula, essencialmente quando submetemos objetos³ quânticos ao experimento de dupla fenda, vejamos:

- (1) **Interpretação Ondulatória:** Consideramos aqui a ideia de *Erwin Schrödinger*, de que os objetos quânticos são na realidade ondas. Antes da detecção, o objeto quântico propaga-se como onda, mas durante a detecção ele torna-se mais ou menos bem localizado, parecendo uma partícula (colapso da onda);
- (2) **Interpretação Corpuscular:** Os objetos quânticos seriam na realidade uma partícula, e que não existe uma onda associada: o padrão de interferência deve ser explicado a partir da interação da partícula com o anteparo que contém as duas fendas;

² A interpretação da complementaridade (dualismo positivista); As teorias de variáveis ocultas (dualismo realista); As interpretações ondulatórias; As visões corpusculares que incluem a interpretação dos coletivos estatísticos, e a estocástica. Pessoa Jr.(2003, p. 5)

³ (elétrons, fótons, prótons, nêutrons, etc)

- (3) **Interpretação Dualista Realista:** afirma que o objeto quântico se divide em duas partes: uma partícula com trajetória bem definida (mas desconhecida), e uma onda associada. A probabilidade da partícula se propagar em uma certa direção depende da amplitude da onda associada, de forma que em regiões onde as ondas se cancelam, não há partícula;
- (4) **Interpretação da Complementaridade:** Elaborada por Niels Bohr. Neste caso, o “fenômeno” em questão é ondulatório, e não corpuscular, pois não podemos inferir a trajetória passada do quantum detectado.

Dentre as interpretações aqui sugeridas, a mais seguida por livros e professores de Física, é sem dúvida, a interpretação de Copenhague, também chamada de Ortodoxa ou da Complementaridade.

Para entender o comportamento da luz em regime quântico, é necessário considerar que a energia de um fóton é dada pela equação $E=h\nu$ e que o momento associado ao fóton é dado por $p = h/\lambda$, onde h é a constante de Planck, ν é a frequência da luz e λ é o comprimento de onda. Na física clássica, a intensidade I de uma onda (energia por unidade de tempo e de área) é proporcional ao quadrado de sua amplitude ψ . Em regime quântico, a intensidade corresponde ao número de quanta detectados, de maneira que se prepararmos apenas um único quantum (fóton ou elétron), a probabilidade de detectá-lo em certa região será proporcional ao quadrado da amplitude da onda associada àquela região, ou seja,

$$\mathbf{Prob.} \propto |\psi|^2$$

Esta regra representa o postulado de Max Born proposto em 1926. Assim, muitos dos mistérios quânticos, tais como o princípio da incerteza e o efeito túnel, são fenômenos descritos pela Física Clássica ondulatória que passam a ser fenômenos quânticos quando reduzimos a intensidade dos feixes de onda. Segundo Pessoa Jr. (2003), o regime quântico é a Física das ondas para baixas intensidades, quando propriedades corpusculares passam a aparecer.

3.2 O INTERFERÔMETRO DE MACH-ZENHDER

Segundo Pessoa Jr. (2003), o Interferômetro de Mach-Zenhder (IMZ) é um aparato experimental capaz de demonstrar a interferência entre ondas. Similar ao experimento da dupla fenda realizado por Young em 1801, mas de forma mais simples, foi desenvolvido independentemente por Ludwig Mach e Ludwig Zehnder em torno de 1892, seguindo o arranjo da figura 1.

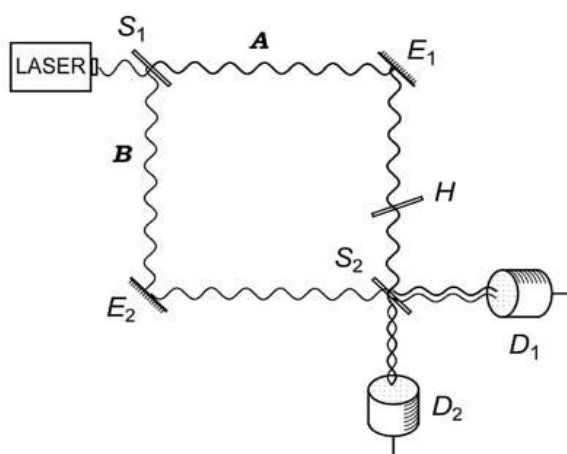


Figura 1 - Esquema do IMZ
Fonte: PESSOA JR., 2003, p. 10

Formado por uma fonte luminosa, que emite um feixe que incide sobre o espelho semi-refletor S_1 , chamado de divisor de feixes, pois transmite 50% da luz incidente (caminho **A**) e reflete os outros 50% (caminho **B**), depois são refletidos pelos espelhos comuns (E_1 e E_2) 100% refletores, que se recombinam no espelho semi-refletor S_2 antes de atingirem os detectores D_1 e D_2 . As distâncias entre os espelhos podem ser ajustadas de acordo com o objetivo do experimento, mas os espelhos devem estar precisamente alinhados para que o ângulo de incidência do feixe seja sempre de 45° .

No processo de emissão do feixe luminoso, ao incidir sobre o espelho semi-refletor S_1 , a componente refletida sofre um deslocamento de fase de $\pi/2$, correspondente a uma diferença de caminho óptico de $1/4$ de comprimento de onda, pode-se verificar que as componentes do feixe que incidem em D_1 estão em fase (interferência construtiva), enquanto que as componentes do feixe que incidem em D_2 estão defasadas em $\lambda/2$ (interferência destrutiva). Têm-se, portanto, 100% do feixe detectado em D_1 e 0% do feixe detectado em D_2 . Se operarmos o IMZ em regime quântico, isto é, se reduzirmos a intensidade da luz a tal ponto que apenas um único fóton seja emitido pela fonte de cada vez (regime monofotônico),

observaremos o mesmo resultado obtido para o caso clássico: 100% dos fótons detectados em D_1 e 0% dos fótons detectados em D_2 (PESSOA JR., 2003, p. 4).

Nesta pesquisa utilizamos o IMZ Virtual, em forma de um software livre de bancada virtual e disponibilizado pelo Instituto de Física da UFRGS no endereço <<http://www.if.ufrgs.br/~fernanda/>>, este programa é distribuído gratuitamente para uso nos estudos da FQ. Com opção de três línguas (Português, Espanhol e Inglês), ele pode operar nos regimes clássico e quântico, dependendo da opção do usuário, e com a possibilidade de utilização de lentes polaroides (em ambos os regimes) e de detectores (em regime quântico).

Pereira (2008) cita que, o IMZ Virtual tornou-se um dos experimentos essencial para a compreensão dos fundamentos da FQ ao provocar naturalmente reflexões sobre o problema conceitual da escolha dos caminhos pelo fóton, e por justificar-se pela falta de recursos nos laboratórios didáticos que possibilitem a preparação de estados monofotônicos, tecnologia alcançada somente a partir dos anos 80 em laboratórios avançados de Física. Similar ao esquema representado na figura 1, IMZ Virtual possui todas as características do aparato experimental, mas com adição de caixas de ferramentas (i), como: (ii) na caixa abaixo poderemos modificar os regimes do feixe (laser ou monofotônico), adicionarmos lentes de polarização e detectores ou a retirada dos espelhos; (iii) e na caixa à direita, verificamos a contagem dos elétrons nos detectores (figura 2).

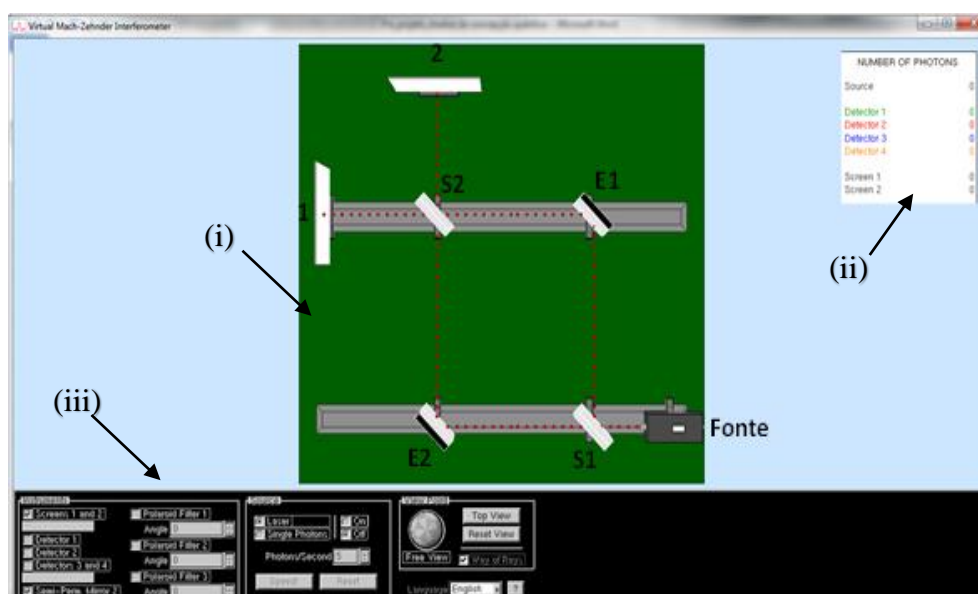


Figura 2 - Visão superior do experimento do IMZ Virtual

Para o regime “clássico” o IMZ é explicado pela teoria ondulatória clássica, ou seja, as leis que regem uma onda mecânica, como as ondas numa corda, regem também para as ondas eletromagnéticas, com o diferencial de que somente as últimas podem se propagar no vácuo.

Na figura 3, apresentamos o regime clássico, cuja fonte luminosa do IMZ é um laser e que no anteparo (1) e (2) temos a formação padrão de interferência. Esta onda de luz pode ser descrita por uma função oscilatória que depende de posição e tempo $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t)$. Se fixarmos uma posição $x = x_0$, o campo elétrico \vec{E} oscila com o tempo entre $-\vec{E}_0$ e \vec{E}_0 passando por zero, ou seja, a onda tem máximo (vales) e mínimo (depressões). Agora, analisando a combinação entre as ondas teremos, dependendo da defasagem entre elas, interferência construtiva (franjas claras) quando combinamos vale com vale, ocorrendo um reforço desta onda, e interferência destrutiva (franjas escuras) quando combinamos vales com depressões obtemos uma amplitude nula. Este padrão de interferência observado na figura 3 pode ser explicado pela diferença de comprimento das trajetórias dos feixes (caminho óptico) que atingem o anteparo (OSTERMANN E PRADO, 2005).

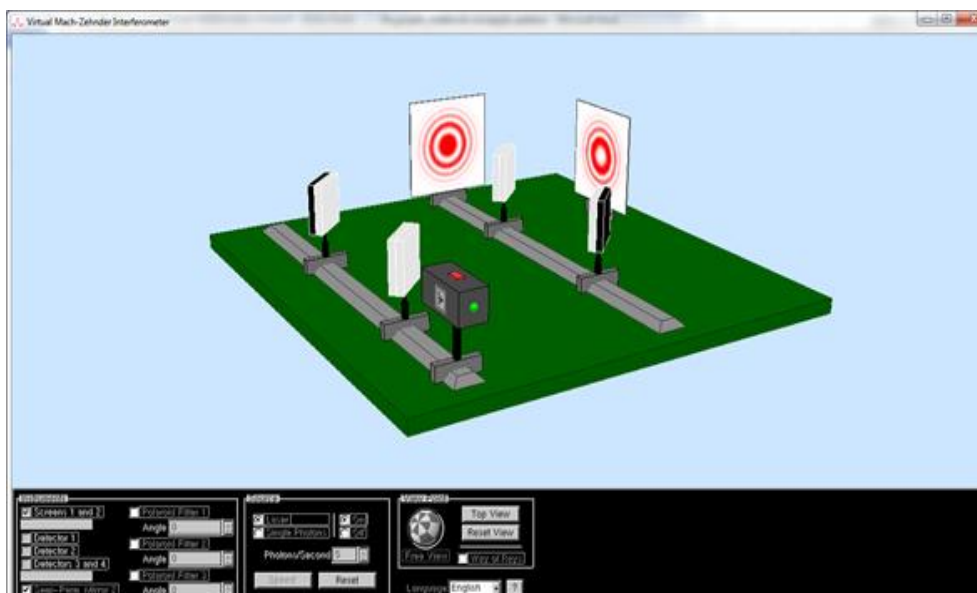


Figura 3 - IMZ Virtual em regime clássico

Diferentemente do regime clássico que tínhamos um feixe de laser, disparo contínuo de elétrons, no regime quântico teremos que reduzir a intensidade do feixe, até conseguirmos o limite de um fóton por vez (regime monofotônico).

O estado de energia de um fóton pode ser representado por uma função de onda complexa $\Psi(x, t) = C e^{\pm i(kx - \omega t)}$ com frequência $\omega = E/\hbar$ e número de onda $k = 2\pi/\lambda$. No momento do envio do fóton (figura 4) o espelho S_1 coloca o fóton em uma superposição de dois estados, ou seja, não sendo possível a determinação do caminho. Diferentemente da mecânica clássica, na qual a posição de detecção do fóton poderia ser em princípio predeterminada, se dadas às condições iniciais, a MQ não permite nenhuma predição em relação à posição de uma única detecção, mas permite uma predição precisa para as estatísticas de muitas detecções de fótons identicamente preparados (OSTERMANN E PRADO, 2005).

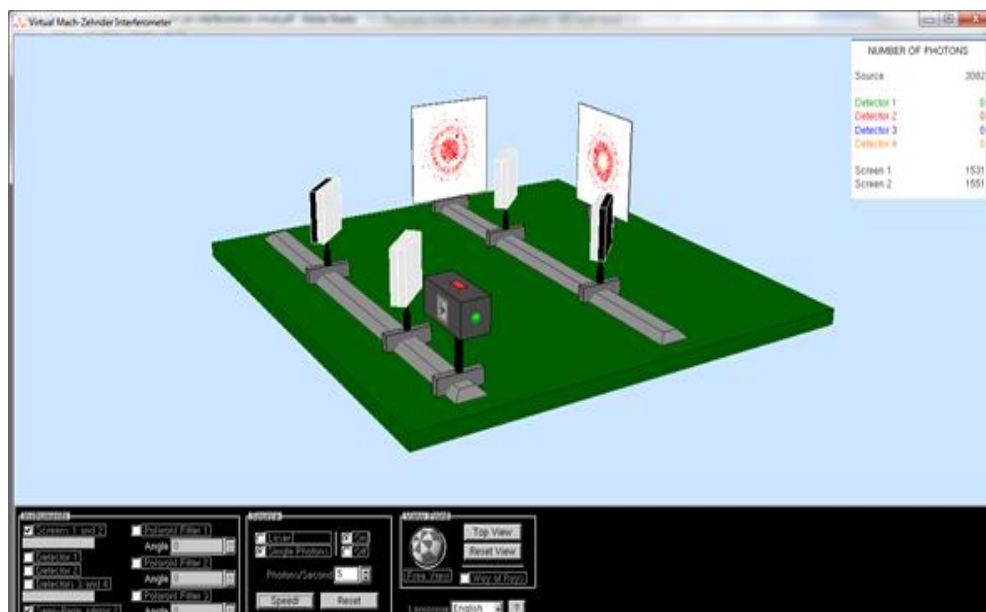


Figura 4 - IMZ Virtual em Regime Quântico

Seguindo as interpretações simplificadas usadas para explicar a dualidade onda-partícula (PESSOA JR., 2003), teríamos que:

- **Interpretação Ondulatória**, talvez o fóton se dividir-se em dois meio fótons no espelho S_1 , mas ainda não foi possível detectar meio fóton;
- **Interpretação Corpuscular**, como já citado não dá para determinar o caminho do fóton, então esta interpretação tem dificuldades para explicar;
- **Interpretação Dualista Realista**, talvez o objeto quântico dividir-se em duas partes (fóton e onda associada), e ao chegar a D_2 a onda se cancela e o fóton chegue a D_1 ;

- **Interpretação da Complementaridade**, o fenômeno deve ser onda ou partícula, nunca os dois, logo, se o fenômeno é examinado como ondulatório, não tem sentido perguntar onde se encontra o fóton.

O IMZ Virtual representa uma releitura mais moderna do experimento de dupla fenda, já que provoca reflexões sobre o problema conceitual da escolha dos caminhos pelo fóton, tornando-se essencial para a compreensão dos fundamentos da FQ. Seu uso em estudos no Mestrado Profissional em Ensino de Física no Instituto de Física da UFRGS, tem se mostrado extremamente válido tanto em termos de motivação para estudos posteriores, quanto em relação a uma visão mais conceitual da FQ (OSTERMANN E PRADO, 2005).

Recentemente, um grupo de físicos liderados por Tonomura et al (1989), reproduziu em seus laboratórios o experimento da dupla fenda de Young, mas de forma moderna, como podemos visualizar na Figura 5. Este aparato é formado por uma fonte eletrônica que emite elétrons, um a um, que passam através de um dispositivo chamado "bi-prisma de elétrons", que consiste em duas placas paralelas e um filamento fino no centro da ordem de $1 \times 10^{-6} m$ de diâmetro. Os elétrons tendo passado através de ambos os lados do filamento são detectados, um por um, como partículas no detector.

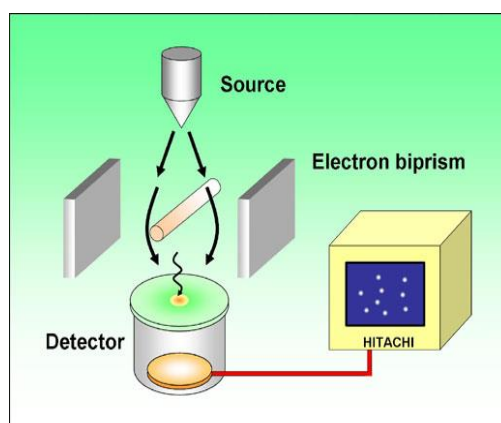


Figura 5 - Experimento da dupla fenda com elétrons individuais
Fonte: TONOMURA et al, 1989

Para a visualização da chegada desses elétrons no detector de partículas, a fonte emite elétrons em uma taxa muito baixa, de apenas 10 elétrons/segundo. Mesmo nesta taxa, com o decorrer do tempo e o acúmulo de elétrons individuais, é possível a visualização ao final um padrão e a formação das franjas de interferência.

Tonomura et al (1989) produziu um vídeo no decorrer do experimento⁴, apresentando durante 20 minutos a chegada dos elétrons no detector, um por um. Na figura 6, temos recortes de quatro momentos no qual tomamos para análise. Inicialmente observamos apenas alguns pontos brilhantes e em posição aleatórias (figura 6(a) e (b)). Com o passar do tempo, aumenta-se o número de elétrons acumulado, algo como franjas regulares começam a aparecer na direção perpendicular (figura 6(c)). Na última cena da experiência, após 20 minutos, conseguimos visualizar com maior nitidez as franjas de interferência (figura 6(d)).

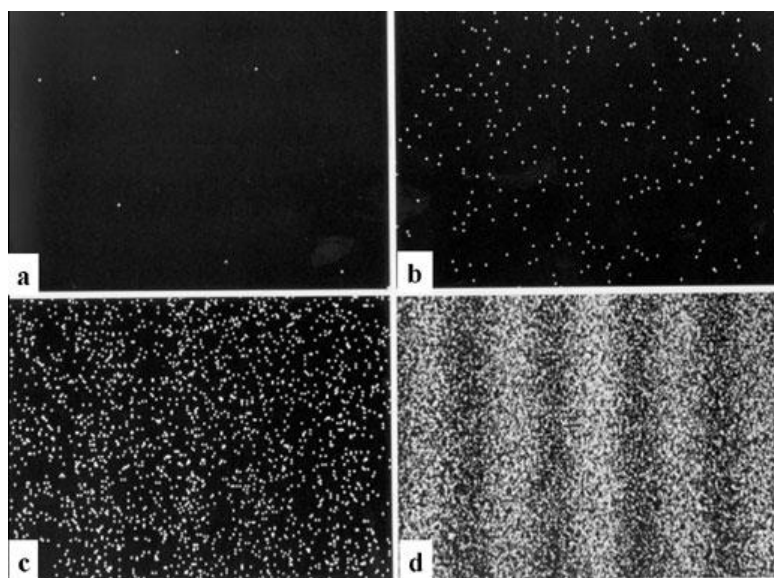


Figura 6 – Recortes instantâneos da chegada dos elétrons do experimento de dupla fenda. (a) 8 elétrons, (b) 270 elétrons, (c) 2.000 elétrons (d) 160.000 elétrons. O tempo total exposição desde o início até a fase (d) é de 20min.

Fonte: TONOMURA et al, 1989

Empiricamente, podemos pensar que as franjas de interferência são produzidas somente quando dois elétrons passam por ambos os lados do bi-prisma de elétron, simultaneamente. Mas isso não pode ocorrer, porque mesmo a uma taxa baixa de 10 elétrons/segundo, eles são emitidos individualmente pela fonte (Figura 6(a) e (b)), mas ao final podemos observar a presença de franjas de interferências (figura 6(d)). Esse é o paradoxo da experiência das fendas duplas: quando não sabemos através de qual fenda o fóton passou, a luz se comporta como onda; quando sabemos, comporta-se como partícula, destruindo o seu padrão de interferência. Portanto, determinação da trajetória de um fóton muda o seu comportamento (BARROS, 2005, p. 25).

⁴ Vídeo disponível em <<http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/movie.html>>

4. METODOLOGIA

Para realização desse estudo, optamos por uma abordagem qualiquantitativa, uma vez que nossa fundamentação teórica está centrada na consolidação conceitual da quântica, visando compreender melhor as implicações previstas no entendimento do fenômeno de interferência quântica para objetos quânticos. Quando afirmamos que privilegiamos a abordagem qualitativa, fomos buscar alguns fundamentos em Oliveira (2003), que afirma:

A abordagem qualitativa 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 (p. 58).

Assim, optando por esta abordagem esperamos compreender, descrever e oferecer subsídios para melhoria do processo ensino-aprendizagem, mais especificamente quanto ao ensino de alguns tópicos da FQ, em relação ao conceito de interferência de objetos quânticos, a partir do uso de uma oficina com experimentos virtuais, do tipo interferômetro IMZ. A nossa pesquisa também se configura como uma pesquisa descritiva, em que descrevemos em detalhes, fatos e fenômenos encontrados num caso específico.

Nessa direção, a segunda parte desta pesquisa foi à análise dos questionários aplicados a 12 licenciandos em Física da UEPB, em Campina Grande, que participaram da oficina “*O uso de experimentos para abordar conceitos de física quântica*”. Elegemos o método de *estudo de caso* para nossa pesquisa de campo, utilizando como instrumento de coleta de dados o uso de questionário, que foi aplicado em duas ocasiões, antes de começarmos a oficina (pré-teste) e após o término da oficina (pós-teste). Optamos por um questionário de perguntas fechadas, por suas afirmações apresentarem categorias ou alternativas de respostas fixas e preestabelecidas, onde o entrevistado deve responder a alternativa que mais se ajusta às suas características ou ideias. Justifica-se a opção pelo método do estudo de caso, visto que para Yin (2010), o *estudo de caso* é uma estratégia metodológica do tipo exploratório, descritivo e interpretativo. O método de estudo de caso facilita a compreensão de fenômenos sociais complexos e segundo esse autor:

O método de estudo de caso permite uma investigação para se preservar as características holísticas e significativas dos acontecimentos da vida real, tais como: ciclos de vida individuais, processos organizacionais e administrativos, mudanças ocorridas em regiões urbanas, relações internacionais e a maturação de setores econômicos (Yin, 2010, p. 20).

Como se pode verificar nessa citação, o estudo de caso é um método eclético e se aplica em diferentes áreas de conhecimentos.

4.1 Estrutura da Oficina

A oficina foi aplicada durante a 7ª Semana de Extensão da UEPB, no período de 23 a 26 de outubro de 2013, no Campus I desta Universidade. Intitulada “*O uso de experimentos para abordar conceitos de FQ*”, essa oficina foi idealizada pelo Prof. Dr. Marcos Barros do departamento de Física da UEPB, tomando como referências os trabalhos de Ostermann e Ricci (2004), Ostermann e Pereira (2009), Pereira (2008) e Barros (2006). O objetivo dessa oficina se balizou em realizar uma investigação sobre o ensino de FQ na formação de futuros professores acerca da dualidade onda-partícula, tomando como instrumento virtual a utilização de um software que simula o IMZ, seguindo as interpretações quânticas sugeridas por Pessoa Jr. (2003).

A amostra da pesquisa foi pensada para um número máximo de 20 alunos, no entanto se fizeram presentes 12 participantes, compreendidos por graduandos em licenciatura em Física, que se distribuía em cinco alunos que estavam cursando a disciplina Mecânica Quântica (MQ), quatro que estavam cursando a disciplina de Física Moderna (FM) e três que ainda não havia cursado ambas as disciplinas.

A oficina foi estruturada em quatro momentos, com uma duração média de quatro horas, sendo dividida da seguinte forma:

- 1º. Momento:** Aplicação do questionário estruturado, para levantamento das concepções prévias, quanto aos conceitos de objetos quânticos e seus respectivos fenômenos. (Em apêndice).
- 2º. Momento:** desenvolvimento das atividades, inicialmente explorando os aspectos conceituais, históricos e filosóficos inerentes a FQ, a partir da:
 - a) Versão fraca da dualidade;
 - b) Interpretação da Complementaridade.
- 3º. Momento:** desenvolvimento das atividades experimentais, utilizando-se de um simulador virtual, do tipo IMZ, com o qual se objetivava a:
 - a) Medição de trajetória de objetos quânticos;

b) Emissão de fótons únicos.

4º. Momento: Reaplicação do questionário estruturado, ao final da oficina, para verificarmos as possíveis mudanças de concepção, quanto a alguns conceitos quânticos, a partir dos possíveis fenômenos investigados. Antes da aplicação desse questionário, utilizamos um vídeo produzido por Tonomura e colaboradores (TONOMURA et al, 1989), em que é possível vislumbrar todas as etapas previstas no IMZ, só que de forma real.

Os questionários do tipo pré e pós-teste utilizados durante a realização da oficina, foram baseados, parcialmente, no trabalho de Ostermann e Pereira (2009), cujo objetivo era o de investigar as concepções de futuros professores de física acerca da dualidade onda-partícula. Como a oficina tratava do experimento da dupla-fenda e o IMZ com partículas quânticas, tivemos que adaptar o nosso questionário, utilizando-se de quatro questões (7, 8, 9 e 11) propostas por Ostermann e Pereira (2009).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os dados obtidos a partir dos instrumentos avaliativos da nossa pesquisa - os questionários. Utilizamos as mesmas questões, para o pré e o pós-teste, na esperança dos alunos revelarem traços de suas concepções quanto aos conceitos quânticos. Ao final dessa pesquisa, analisaremos as respostas dadas a cada uma das questões formuladas fazendo uma comparação entre a resposta científicas e as respostas dadas pelos participantes.

Para identificação dos alunos, utilizamos símbolos constituídos por letra e número, como exemplo A1 ou B4, tomamos o uso de letras para classificarmos: **(A)** para os que estão cursando a disciplina de FM; **(B)** para os que estão cursando MQ; e **(C)** para os que ainda não cursaram ambas as disciplinas.

No primeiro quesito, perguntamos ao participante se o mesmo cursa ou já cursou as disciplinas de FM e/ou MQ? As respostas dadas podem ser visualizadas na tabela 1, onde apenas três alunos ainda não haviam cursado as disciplinas, que são essências para a compreensão dos conceitos quânticos aqui abordados.

Tabela 1 - Disposição das disciplinas de FMC dos alunos participantes

Disciplinas	Status	
	Cursando	Não Cursou
Física Moderna	1A, 2A, 3A, 4A	1C, 2C, 3C
Mecânica Quântica	1B, 2B, 3B, 4B 5B	
Totalizando		
Física Moderna	4	3
Mecânica Quântica	5	

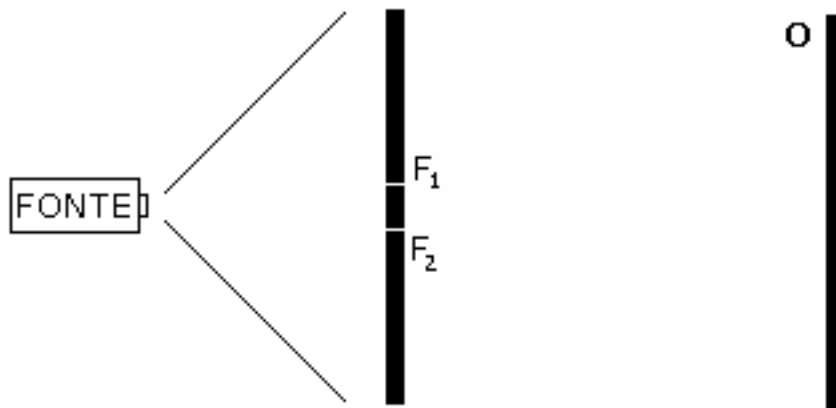
A tabela 2 apresenta os resultados das respostas do pré-testes, realizado antes da oficina.

Tabela 2 - Resultado do pré-teste

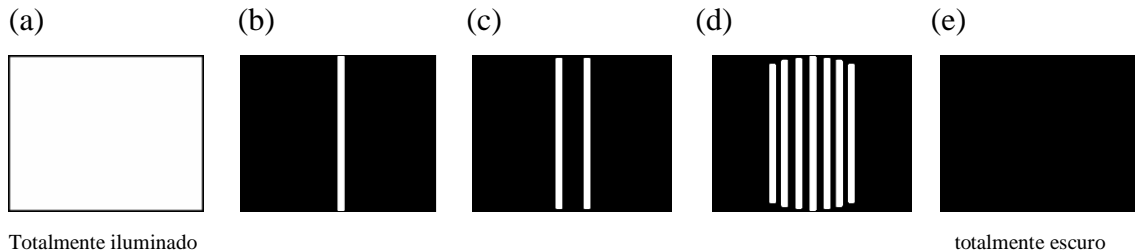
Respostas										
Questão	a)	%	b)	%	c)	%	d)	%	e)	%
02	1C	8	5B	8	1A, 2A, 3A, 4A, 3B, 2C	50	1B, 2B, 4B, 3C	34	-	-
03	-	-	2A, 4A, 1B, 2B, 5B, 2C	50	3B, 1C	17	4B, 3C	17	1A, 3A	17
04	3B, 4B, 5B	25	-	0	1A, 2A, 4A, 1B, 1C	41	3A, 2B	17	2C, 3C	17
05	1A, 2A, 1B, 2B, 4B, 1C	50	4A	8	3A, 2C	17	3C	8	3B, 5B	17

As questões de 2 a 5 testam as noções que os estudantes têm acerca do fenômeno de interferência no experimento de dupla fenda em ambos os regimes: clássico (superposição de ondas) e quântico (superposição de estados), foram introduzidas pelo enunciado abaixo:

A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas, F_1 e F_2 , antes de ser projetado num anteparo O , constituído de uma tela fosforescente. Considere que a espessura das fendas, assim como a separação entre as mesmas, é da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente e muito menor que a distância entre as fendas e o anteparo.

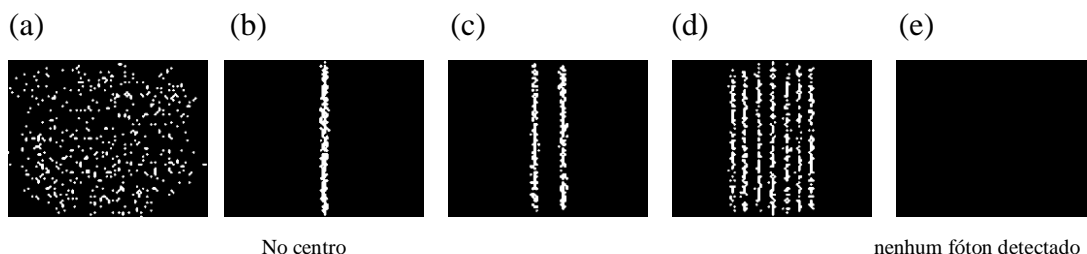


Questão 02. Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, observada no anteparo?



Na questão 02, temos um feixe luminoso monocromático e contínuo, no qual verificamos na tabela 2 que 50% dos participantes escolheram o padrão previsto para partículas clássicas **(c)** (1A, 2A, 3A, 4A, 3B, 2C), apresentando informações de que a luz se propaga em linha reta paralela, após o orifício, de forma semelhante à proposta por Newton, levando em consideração a abertura da fenda, mas sem ter noção do fenômeno da difração, no qual, todos os alunos que estão cursando FM optaram por esta alternativa. Enquanto que 34% reconheceram o padrão de interferência para a luz **(d)**, em sua maioria alunos que estão cursando MQ. Ressaltando ainda que, os alunos que ainda não cursaram as disciplinas optaram, em sua maioria, pela alternativa **(c)**, seguindo o padrão clássico.

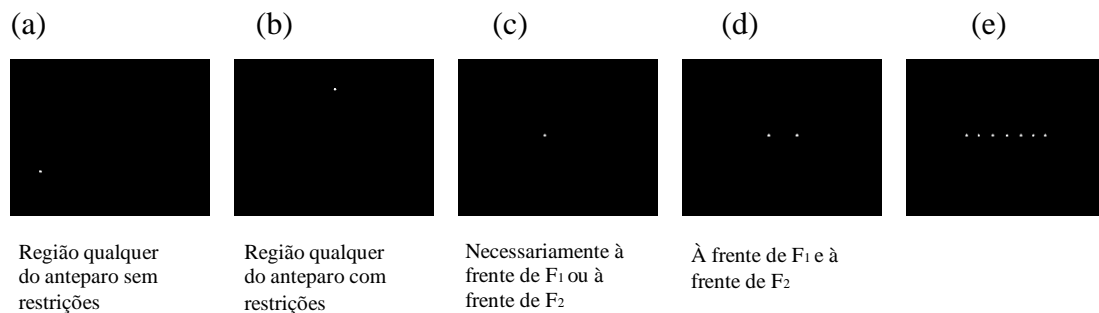
Questão 03. Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a taxa de emissão seja de 1 fóton por segundo).



Esta é uma situação em que este feixe de luz é reduzido, ao ponto de apenas um fóton será emitido de cada vez (regime monofotônico), passando a envolver o regime quântico. Pela tabela 2, verificamos que 50% dos alunos ilustraram que este feixe de fótons se concentraria no centro do anteparo **(b)**, compreendido entre alunos que cursam FM (A2, A4) e MQ (1B, 2B,

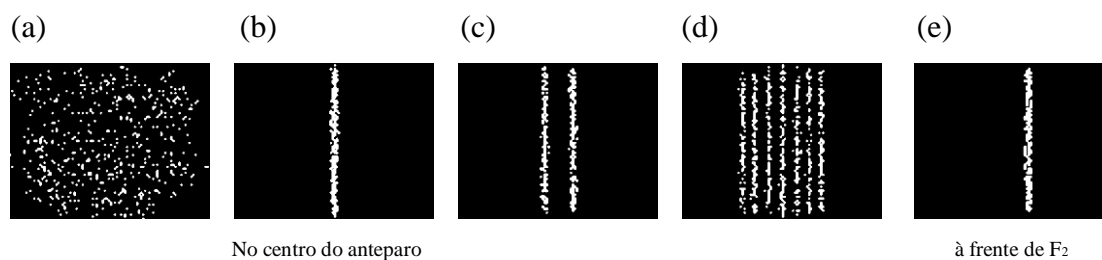
5B) e um aluno que ainda não cursou ambas disciplinas (2C). Apenas 17% escolheram o padrão previsto para partículas clássicas **(c)** (3B, 1C) seguindo o resultado anterior, enquanto que apenas 17% reconheceram o padrão de interferência para a emissão de feixe de fótons **(d)** (4B, 3C).

Questão 04. Se a fonte emitisse apenas um único fóton, qual das alternativas melhor representa uma possível imagem, vista de frente, que poderia ser vista no anteparo após a sua emissão?



Já para a questão 04, temos a emissão de apenas um único fóton contra a dupla fenda e desejamos saber onde ele se encontrar no anteparo. Na tabela 2 temos que 41% dos participantes (1A, 2A, 4A, 1B, 1C) responderam que necessariamente o fóton se apresentaria à frente das fendas F_1 ou F_2 , reconhecendo a existência de locais proibidos para a emissão de um único fóton **(c)**, respondida em sua maioria por alunos que estão cursando FM, seguindo a concepção clássica da luz. Já 25% dos participantes (3B, 4B, 5B) responderam que este fóton poderia estar em qualquer região do anteparo sem restrições **(a)**, todos cursando MQ, e dois alunos optaram pela a alternativa **(d)** (3A, 2B) assumindo que este fóton poderia se dividir em duas partes. É importante ressaltar que nenhum optou pela alternativa **(b)**, cujo melhor se adequa aos conceitos quânticos, pois o fóton poderá se localizar em qualquer região do anteparo, mas com restrições.

05. Se, ao invés de um fóton, a fonte emitisse um feixe mono-energético de elétrons (todos de mesma energia) com intensidade suficientemente baixa para que um único elétron seja emitido de cada vez. Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a tela seja revestida com tinta que brilha ao ser atingido por um elétron)



Ao invés de um feixe de luz, fosse emitido um feixe mono-energético de elétrons. Para a questão 05 observamos na tabela 2 que 50% (1A, 2A, 1B, 2B, 4B, 1C) escolheram a alternativa (a), ilustrando que este feixe mono-energético (elétrons) chegaria desordenado sem qualquer restrição, enquanto que 17% (3A, 2C) escolheram a alternativa (c) que apresentariam um padrão previsto para partículas clássicas (c). É interessante frisar que para a alternativa (d), que apresenta um padrão de interferência quântica, apenas um aluno que ainda não havia cursado ambas as disciplinas (3C) optou, enquanto que apenas 8% escolheram o padrão quântico (b).

Analisando as respostas para o pré-teste, que possui o intuito de verificar as concepções quânticas prévias dos alunos quanto aos conceitos de dualidade onda-partícula e os fenômenos de difração e interferência em fenda dupla, observamos que o número de alunos que conseguiram perceber e responder corretamente os padrões quânticos, segundo as respostas dadas por Ostermann e Pereira (2009) (02. (d), 03. (d), 04. (b) e 05. (d)), foi baixa.

Conforme verificamos no trabalho de Barros (2006), que realizou um pré-teste com alunos do Curso Licenciatura em Física da UEPB, encontramos em nosso pré-teste resultados semelhantes. As respostas dadas pelos alunos aproximam-se do cotidiano dos mesmos, que observam diversos fenômenos nos quais a luz se propaga em linha reta ao atravessar aberturas cujas dimensões são maiores que a faixa de frequência da luz visível e estas respostas foram dadas principalmente por alunos que estão cursando a disciplina de FM, além dos que ainda não cursaram as disciplinas.

Para as questões 03 e 05 em que temos um regime monofônico e um em regime mono-energético de elétrons, percebemos que os alunos não compreendem bem a ideia de interferência, além de não conseguir diferenciar os conceitos de fótons e elétrons, pois verificamos respostas muito diferentes para fenômenos similares, conforme indica Barros (2006).

Quanto à questão 04, seguindo as interpretações simplificadas de Pessoa Jr. (2003), verificamos um maior número de resposta (c) para a “*Interpretação Corpuscular*”, na qual necessariamente esse fóton deveria se encontrar na frente de F_1 ou F_2 , seguindo o padrão

clássico da luz. Para o grupo que escolheu a alternativa (a), entendemos que eles usam a interpretação “*Dualista Realista*”, onde o objeto quântico se divide em duas partes, acompanhando a onda e associando-se a ela. Ao chegar ao anteparo, o fóton passa sem restrição de localização. Ainda tivemos a escolha pela a alternativa (d), usando a “*Interpretação Ondulatória*” em que o fóton pudesse dividir-se em dois meio fótons. Nenhum aluno escolhe a alternativa (b) que apresenta a melhor interpretação para a chegada de um único fóton.

Segundo a tabela 02, obtivemos os seguintes resultados para as respostas corretas: **02.** 34% (1B, 2B, 4B, 3C), **03.** 17% (4B, 3C), **04.** 0% e **05.** 8% (3C). Podemos observar uma média de acerto baixo, formado em sua maioria por alunos de MQ e um que ainda não havia cursado ambas as disciplinas e nenhum aluno de FM. Esses resultados também podem ser observados no trabalho de Barros (2006), onde mesmo os alunos que cursam MQ, que já viram quase todos os conteúdos exigidos pelo Curso de Licenciatura em Física, em relação aos alunos de FM, apresentam os mesmos erros conceituais, evidenciando falta de um estudo mais detalhado do fenômeno, do ponto de vista histórico e experimental.

Após a realização da oficina e a utilização dos recursos virtuais, como ferramenta facilitadora para a aprendizagem, foi reaplicado o mesmo teste para verificarmos e discutirmos as possíveis alterações ocorridas no sistema de construção dos alunos em relação ao tema, que podemos conferir os resultados na tabela 3.

Tabela 3 - Resultado do pós-teste

Respostas										
Questão	a)	%	b)	%	c)	%	d)	%	e)	%
02	-	0	4 ^a	8	1A, 2A, 3B	25	3A, 1B, 2B, 4B, 5B, 1C, 2C, 3C	67	-	0
03	4A, 1B, 5B	25	2 ^a	8	3B	8	1A, 3A, 2B, 4B, 1C, 2C, 3C	59	-	0
04	4A, 5B	16	3A, 1B, 2B, 3B, 4B, 1C	50	1A, 2A	17	-	0	2C, 3C	17
05	1A, 2A, 3A, 1B, 2B, 4B, 1C	58	-	0	3B	8	5B, 2C, 3C	25	4A	8

Para a questão 02, verificamos na tabela 3 uma mudança de concepção por parte dos alunos, apresentando um aumento significativo pela escolha da alternativa **(d)**, de 34% para 67% (3A, 1B, 2B, 4B, 5B, 1C, 2C, 3C), reconhecendo o padrão de interferência da luz visualizado pelas franjas regulares de interferência, e uma redução 50% para 25%, pelo padrão clássico de visualizar a luz, alternativa **(c)**. Ressaltando ainda que, os alunos que ainda não cursaram as disciplinas optaram pela alternativa **(d)**, padrão de interferência da luz.

Para o regime monofônico, apresentado na questão 03, vemos um aumento pela alternativa **(d)** de 17% para 59% (1A, 3A, 2B, 4B, 1C, 2C, 3C) que representa reconheceram o padrão de interferência para a emissão de feixe de fótons, franjas regulares. Apenas um aluno de MQ (3B) escolheu o padrão previsto para partículas clássicas **(c)** seguindo o resultado do pré-teste. Ressaltamos também uma escolha pela alternativa **(a)**, que não houve no pré-teste de 25%, demonstrando que este fóton chegaria sem restrições e padrão de interferência.

Na emissão de um único fóton, como acontece na questão 04, verifica-se um decréscimo pela alternativa **(c)**, de 41% para 17%, descrevendo necessariamente uma “*Interpretação Corpuscular*”, e uma adesão pela alternativa **(b)** de 50% (3A, 1B, 2B, 3B, 4B, 1C), que no pré-teste não aconteceu, demonstrando que este fóton poderia se encontrar em qualquer região, mas com restrição, correspondendo ao padrão de quântico. Percebemos também que houve um abandono pela alternativa **(d)**.

Para a emissão de um feixe mono-energético de elétrons, questão 05, observamos um aumento pela alternativa **(a)**, de 50% para 58% (1A, 2A, 3A, 1B, 2B, 4B, 1C), que demonstra a chegada desses elétrons de modo desordenado e sem restrições no anteparo. Diagnosticamos também que houve um acréscimo pela alternativa **(d)** de 8,3% para 25% (5B, 2C, 3C), em função do padrão das franjas de interferência, e um decréscimo pelas demais alternativas.

Para as respostas dadas no pós-teste, que possui o objetivo de averiguar as mudanças de concepções quânticas dos alunos após a participação da oficina, observamos que aconteceu uma mudança significativa nas respostas dadas pelos alunos, passando a compreender que se tratava de um fenômeno quântico e não um padrão previsto para partículas clássicas, semelhante à proposta por Newton de que a luz se propaga em linha reta, conforme indicam os trabalhos de Barros (2006) e Ostermann e Pereira (2009).

A partir da figura 7, que demonstra os resultados dos questionários aplicados com pré e pós-teste, verificamos que há uma mudança nas concepções dos participantes, notadamente no que diz respeito a um aumento pela opção de resposta para o padrão quântico (02. (d) 34% → 67%; 03. (d) 17% → 59%; 04. (b) 0% → 50%; e 05. (d) 8% → 25%) e uma diminuição para

respostas dentro de um padrão clássico (02. (c) 50% → 25%, 03. (c) 17% → 8%, 04. (c) 41% → 17% e 05. (c) 17% → 8%).

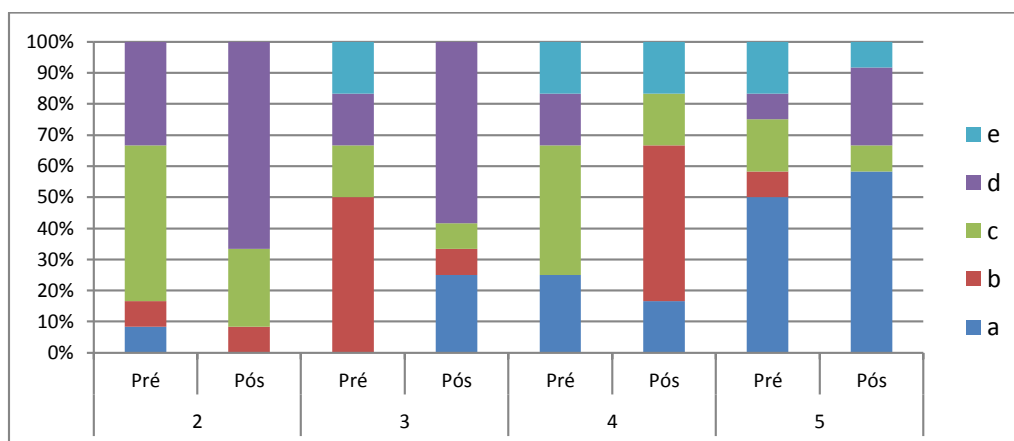


Figura 07 - Comparação das respostas do Pré-teste e Pós-teste

A maior parte das respostas com um perfil quântico foi dada pelos alunos de MQ, demonstrando uma melhor assimilação do conteúdo. Os alunos de FM não tiveram uma boa participação dos resultados dos acertos. No entanto, Mas devemos ressaltar as repostas dos alunos que ainda não havia cursado ambas as disciplinas, que participaram no volume dos acertos, como podemos visualizar na tabela 3.

Em síntese, as respostas dadas ao pós-teste, como revisão construtiva, mostraram que houve mudanças nas concepções dos alunos, em relação ao pré-teste, e que elas não ocorreram aleatoriamente, mas devido a um esforço por recursos didáticos concentrados em apresentar e explorar os aspectos conceituais, históricos e filosóficos inerentes a FQ a partir de experimentos virtuais, no sentido de facilitar a compreensão dos postulados quânticos. (BARROS, 2006)

No entanto, Ostermann e Pereira (2009) ressaltam que estes resultados não são satisfatórios para uma turma de futuros professores de Física, já que o tema dualidade onda-partícula e os experimentos aqui apresentados deveriam ser mais familiares aos alunos, assim como o aparato experimental do IMZ, por se tratar de um experimento mais moderno e crucial na ilustração do comportamento quântico dos objetos microscópicos.

Barros (2006) e Ostermann e Pereira (2009) evidenciam que este resultado parece ser um reflexo da abordagem tradicionalista no ensino destas disciplinas, cujo enfoque no formalismo matemático e a resolução de lista de exercício, acabam colocando em segundo plano a natureza dos objetos quânticos, explorar os aspectos conceituais, históricos e filosóficos inerentes a FQ.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante desses resultados, verificamos que os licenciandos participantes deste estudo, mesmos os que estão cursando as disciplinas de FM e MQ, possuem dúvidas quanto aos padrões de comportamento dos objetos quânticos, usando padrões da Física Clássica para explicar estes fenômenos, mesmo apresentando uma melhoria após a oficina no pós-teste. Mas, as literaturas ressaltam que estes resultados não são satisfatórios para uma turma de futuros professores de Física, já que o tema dualidade onda-partícula e os experimentos aqui apresentados deveriam ser mais familiares aos licenciandos.

Quanto ao uso de experiências didáticas inovadoras, como o software IMZ Virtual e os vídeos, apresentaram-se neste estudo como ferramentas fundamentais na intervenção e articulação para o ensino da FQ. Pois, mesmo com o professor mediando à oficina, estes ofereceram aos licenciandos a possibilidade de visualização prática dos fenômenos quânticos, auxiliando assim na assimilação dos conteúdos, conforme demonstra as literaturas que fizemos uso.

Por ser ainda um estudo preliminar, não se pode afirmar que os resultados aqui obtidos são causados por um modelo de ensino tradicionalista ou mesmo por uma grade curricular, nos cursos de licenciatura em Física, com pouca evidencia para o ensino da FQ, para que os licenciandos apresentem tais deficiências. De modo geral, espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para a discussão sobre o ensino da FQ nos cursos de licenciatura em Física, chamando a atenção para a importância de se investigar, cada vez mais, a formação inicial dos professores. Já que tais dificuldades podem refletir diretamente na introdução desses conceitos tanto no ensino médio, quanto no superior. Entendemos que uma boa formação conceitual, histórica e filosófica da FQ, aos licenciandos em física, poderemos implementar com êxito os seus fundamentos.

Temos ciência que este é um tema que precisa ser aprofundado em estudos futuros, mas espera-se que os resultados deste possam contribuir para a discussão sobre o ensino da FQ nos cursos de licenciatura em Física, chamando a atenção para a importância de se investigar, cada vez mais, o ensino da FQ na formação inicial dos professores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, Marcos Antônio. **Difração de elétrons: concepções de licenciandos em Física e possíveis mudanças através do ciclo da experiência kellyana**. Universidade Federal Rural de Pernambuco: Recife, 2006. Dissertação 110 p.

EULER, M; HANSELMANN, M; M-CJLLEIZ, A **Studeats' views of modeis and concepts in modern physics**. Paper apresentado em At the Annual Mecting National Association for Research in Science Teaching. Boston, march, 1999, disponível em: <[www.phys.ksu.edu/per~!/pMers/narst/qm](http://www.phys.ksu.edu/per/~!pMers/narst/qm)>

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman lecture on Physics**. New York: Addison-Wesley, 1963. Vol III. disponível em <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html> acessado em 01/06/2014.

FREIRE JR., Olival; CARVALHO NETO, Rodolfo Alves. **Universo dos Quanta: uma Breve História da Física**. São Paulo, Editora FTD, 1997. ISBN: 853223545X

FREIRE JR., Olival. **David Bohm e a controversia dos quanta**. Editora Unicamp, Coleção CLE, Campinas, 1999.

GERBASSI, Reuber Scofano; OLIVEIRA, Fabio Ferreira de; VIANNA, Deise Miranda. **Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 3, p. 447-454, (2007)

GRECA, Ileana Maria & FREIRE JR., Olival. **Metting the challenge: Quantum physics on introduction physics courses**. Michael Matthews (ed.), History, Philosophy and Science Teaching Handbook, Springer, forthcoming, 2012.

GRECA, Ileana Maria; MOREIRA, Marco Antônio. **Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória**. Revista Investigações em Ensino de Ciências – V6(1), pp. 29-56, 2001.

GREENSTEIN, George; ZAJONC, Arthur G. **The Quantum Challenge, Second Edition : Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics**. Editora Jones and Bartlett Publishers, Inc, 2005, ISBN: 9780763724702.

HERSCOVITZ, Victoria Elnecave; MOREIRA, Marco Antonio; PANTOJA, Glauco Cohen Ferreira. **Uma revisão da literatura sobre a pesquisa em ensino de Mecânica Quântica no período de 1999 a 2009**. Revista BECT, vol 4, núm 3, set./dez. 2011

KUHN, Thomas S. **Black-body Theory And the Quantum Discontinuity, 1894-1912**. Editora University of Chicago Press, 1987. ISBN: 9780226458007

OSTERMANN, Fernanda.; MOREIRA, Marco Antônio. **Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio"**. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, jan./abr. 2000.

OSTERMANN, Fernanda; PEREIRA, Alexsandro P. **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 2009a

OSTERMANN, Fernanda; PEREIRA, Alexsandro P. **Sobre o ensino de física moderna e contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente**. Revista Investigações em Ensino de Ciências – V14(3), pp. 393-420, 2009b

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. S. F. **Investigando a aprendizagem de professores de física acerca do fenômeno da interferência quântica**. Ciência & Educação. v. 14, n. 1, p. 35-54, 2008

OSTERMANN, Fernanda e PRADO, Sandra Denise **Interpretações da mecânica quântica em um Interferômetro virtual de Mach-Zehnder**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 2, p. 193 - 203, (2005)

OLIVEIRA, M. M de. **Como fazer projetos, relatórios, monografias dissertações e teses**. Recife, Pe: Edições Bagaço, 2003.

PEREIRA, Alexsandro P. **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**. Porto Alegre, 2008, Dissertação, 140 pg.

PEREIRA, Alexsandro P.; OSTERMANN, Fernanda. **Uma análise da produção acadêmica recente sobre o ensino de física moderna e contemporânea no Brasil**. In: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, 6., Florianópolis. Anais do... E. F. Mortimer (Org.) Florianópolis: ABRAPEC, 2007. 1 CD-ROM

PESSOA Jr., O. **Conceitos de física quântica**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2003.

REZENDE Jr., Mikael Frank; CRUZ, Frederico Firmo de Souza. **Física Moderna e Contemporânea na formação de licenciandos em Física: necessidades, conflitos e perspectivas**. Revista Ciência & Educação, v. 15, n. 2, p. 305-21, 2009.

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

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookmann, 2010.

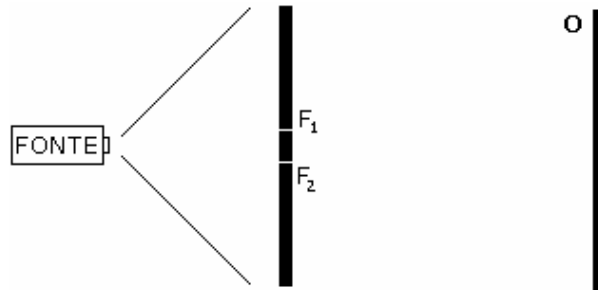
APÊNDICE A – TESTE DE CONCEPÇÕES QUÂNTICAS

Prezado participante, este questionário refere-se a um teste de concepções relativas a dualidade onda-partícula⁵. Sua participação é importante para a nossa pesquisa. O seu nome será mantido em sigilo. Obrigado.

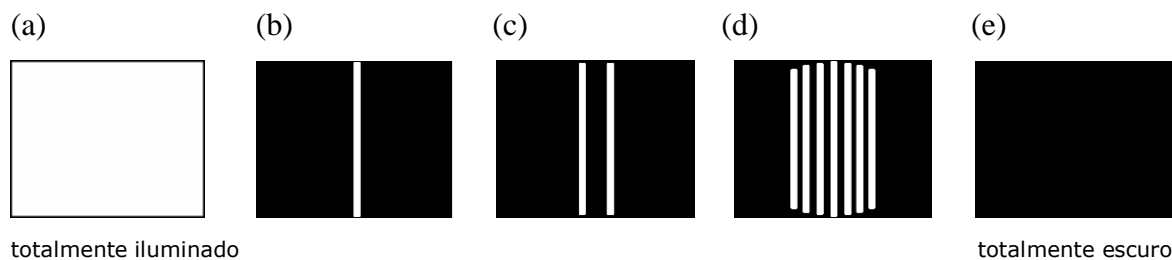
01. Você cursa ou já cursou a disciplina de Física Moderna ou Mecânica Quântica?

As questões 02 a 05 referem-se ao enunciado abaixo.

A figura abaixo representa uma montagem experimental, vista de cima, de um feixe de luz monocromático e coerente, emitido por uma fonte luminosa. O feixe luminoso passa por duas fendas estreitas e paralelas, F_1 e F_2 , antes de ser projetado num anteparo O , constituído de uma tela fosforescente. Considere que a espessura das fendas, assim como a separação entre as mesmas, são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz incidente e muito menor que a distância entre as fendas e o anteparo.

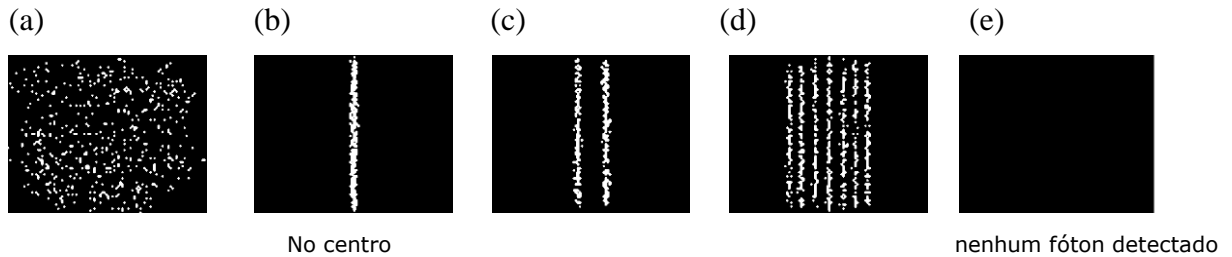


02. Qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, observada no anteparo?

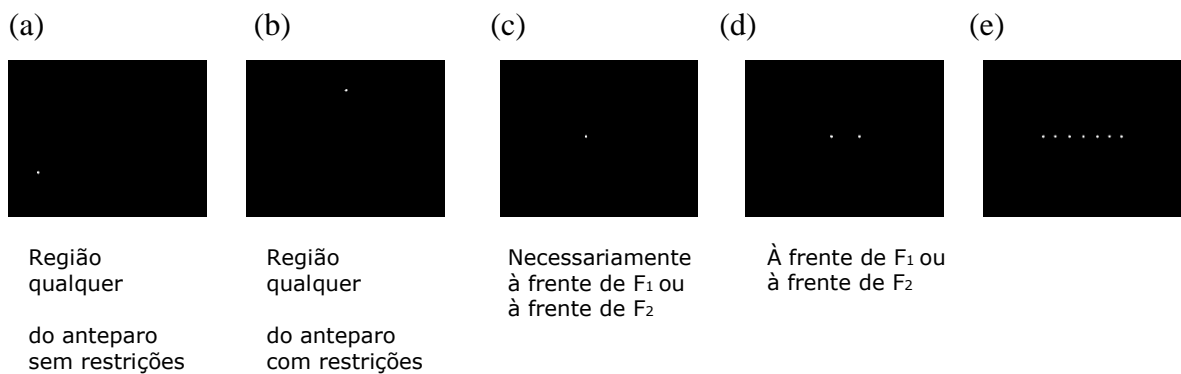


⁵ PEREIRA, Alessandro P.; CAVALCANTI, Cláudio J. de H.; OSTERMANN, Fernanda. **Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física.** Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol.8 N°1, 2009. (adaptado)

03. Se a intensidade da luz emitida pela fonte no experimento fosse tão tênue que apenas um fóton fosse emitido de cada vez (regime monofotônico), qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a taxa de emissão seja de 1 fóton por segundo).



04. Se a fonte emitisse apenas um único fóton, qual das alternativas melhor representa uma possível imagem, vista de frente, que poderia ser vista no anteparo após a sua emissão?



05. Se, ao invés de um fóton, a fonte emitisse um feixe mono-energético de elétrons (todos de mesma energia) com intensidade suficientemente baixa para que um único elétron seja emitido de cada vez, qual das alternativas melhor representa a imagem, vista de frente, que observaríamos no anteparo após algumas horas? (suponha que a tela seja revestida com tinta que brilha ao ser atingida por um elétron)

